

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Desenvolvimento de uma Ferramenta para Projecto de Quadros Eléctricos de Baixa Tensão

Carlos Gustavo Teixeira Paiva Fernandes

Relatório de Projecto submetido no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major de Energia

Orientador: Prof. Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa

Julho de 2009

Resumo

Este documento corresponde ao relatório de dissertação do “*Desenvolvimento de uma Ferramenta para Projecto de Quadros Eléctricos de Baixa Tensão*”, no âmbito do Projecto Final do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Major de Energia, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Em termos genéricos, este projecto refere-se ao estudo de quadros eléctricos de baixa tensão, às normas e condicionantes do seu dimensionamento e construção. Refere-se também aos invólucros, às classes das instalações eléctricas e aos índices de protecção destes equipamentos.

É também um estudo sobre as correntes de curto-circuito e os seus efeitos nos quadros eléctricos, especificamente dos esforços provocados pelo aparecimento das forças electro-dinâmicas decorrentes de tais situações de defeito. Essas forças provocam esforços nos barramentos (instalados nos quadros eléctricos) e consequentemente nos suportes deles. A optimização da forma produtiva do suporte, da sua montagem e da distância que estes devem ter uns dos outros quando montados no quadro é dependente dos efeitos possíveis que um curto-circuito pode provocar.

A ferramenta informática desenvolvida tem como base este estudo e estas condicionantes, e pretende ser um software de utilização simples, mas que permite, mediante a informação do projecto eléctrico, ajudar no dimensionamento dos quadros eléctricos por parte de quadristas e instaladores.

Abstract

This document corresponds to the thesis report: “*Development of a Tool to Project Low Tension Electrical Switchboard’s*”, under the Final Project of the Integrated Master in Electrical and Computers Engineering, Major Energy, Faculty of Engineering, University of Porto.

In generical terms, this project refers to the study of low tension switchboard’s, to the international standards and constraints of it’s sizing and specific construction. It refers also to the study of the enclosures, electrical instalations classes and to the rates of protection of this equipament.

It is also a study to the short circuit currents and it’s effects on the electrical switchboard’s, specifically the efforts that appear due to the appearence of the electrodynamic forces. Those forces cause efforts in the busbars (installed in the switchboard) and consequently in their supports. The optimization to the way of manufacturing, it’s instalation in the switchboard and the distance that the supports should have between each other are dependent of the effects of the short circuit currents.

The main objective of this thesis is the development of a easy to understand software based on the constraints that were studied. It’s a software that - knowing the information of an electrical project - helps in the development and sizing of the switchboard’s by electrical installers.

Agradecimentos

Os agradecimentos são conotados por vezes de uma certa banalidade, mas a realidade é que este documento representa o fim de uma etapa longa e com muitos precalços, e os agradecimentos que aqui deixo são sentidos e sinceros. Dessa etapa destacam-se obviamente as mais variadas pessoas.

O mais profundo sentimento de gratidão, vai obviamente para aos meus pais, pelo tempo e especialmente pela paciência que sempre tiveram!

À Mara por compreender a exigência de tempo desta etapa. E por nas alturas complicadas dizer simplesmente: "Vai correr bem, não te preocupes!".

Os amigos passam connosco pelas coisas, muitas vezes ajudando sem eles próprios saberem como. Para eles um abraço de amigo.

Ao meu orientador, Professor Artur Costa, pela enorme disponibilidade e apoio constante, desde o primeiro dia, na elaboração desta dissertação.

A toda a equipa da General Electric, que sempre me acompanhou e ajudou com pequenas ou grandes soluções a pequenos ou grandes problemas.

Carlos Paiva Fernandes

”Não sendo embora pessoa a quem se possa apontar como exemplo ou modelo de bravura, (...), adquiriu um conhecimento de noite, sombra, escuro e treva que acabou por compensar a sua timidez natural e que agora lhe permite, sem excessivo temor, estender o braço por dentro do corpo do dragão à procura do interruptor da electricidade.”

José Saramago

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do Projecto	1
1.2	Objectivos do Projecto	2
1.3	Metodologia de Trabalho	2
1.4	Estrutura da Dissertação	3
2	Quadros Eléctricos de Baixa Tensão	5
2.1	Generalidades sobre Quadros Eléctricos	5
2.1.1	Função	5
2.1.2	Requisitos	7
2.1.2.1	Normas Aplicáveis	13
2.1.2.2	Aspectos Gerais de Dimensionamento	13
2.1.3	Tipos	15
2.2	Invólucros	15
2.2.1	Normas Aplicáveis	16
2.2.2	Tipos de Invólucros	19
2.3	Conclusão	20
3	Curto-Circuitos e Esforços Electrodinâmicos	23
3.1	Curto-Circuitos	23
3.1.1	Simétricos	24
3.1.1.1	Curto-Circuito Trifásico	24
3.1.2	Assimétricos	27
3.1.2.1	Curto-Circuito Fase-Fase	29
3.1.2.2	Curto-Circuito Fase-Terra	30
3.1.2.3	Curto-Circuito Fase-Fase-Terra	31
3.1.3	Compilação de fórmulas para a determinação da I_{cc}	32
3.1.4	Corrente de Curto-Circuito para a determinação dos Esforços	33
3.2	Esforços Electrodinâmicos	36
3.2.1	Aspectos Gerais de Dimensionamento	37
3.2.2	Métodos dos Elementos Finitos	47
3.3	Conclusão	50
4	Armários e Barramentos	51
4.1	Armários e Invólucros existentes	51
4.2	Barramentos	57
4.3	Conclusão	64

5	Ferramenta para Quadristas	67
5.1	Software Desenvolvido	67
5.1.1	‘Interface’ com o Utilizador	72
5.2	Aplicação da Ferramenta	77
5.2.1	Utilizando os pressupostos de dimensionamento da GE	77
5.2.2	Utilizando os pressupostos de dimensionamento propostos	79
5.3	Conclusão	80
6	Síntese e Conclusões	83
6.1	Síntese	83
6.2	Trabalhos Futuros	85
	Referências	88

Lista de Figuras

2.1	Contacto Directo [1]	9
2.2	Contacto Indirecto [1]	9
2.3	Planificação de instalações de manobra e aparelhagem de distribuição [2] .	14
2.4	Armários Murais [3]	16
2.5	Armário de Solo [3]	16
2.6	Armário Subterrâneo [3]	17
3.1	Componentes directa, indirecta e homopolar	27
3.2	Curto-Circuito Fase-Fase	29
3.3	Curto-Circuito Fase-Terra	31
3.4	Curto-Circuito Fase-Fase-Terra	32
3.5	Esquema de uma Rede [4]	34
3.6	Variação no tempo da corrente de curto-circuito - a) num ponto próximo do alternador b) num ponto afastado do alternador [2]	35
3.7	Variação de K em função de R/X (CEI60909) [5] [4]	36
3.8	Força Magnética	37
3.9	Forças por Fase	37
3.10	Momento de Flexão	39
3.11	Momento de Compensação	39
3.12	Esforço de Flexão: Força Aplicada no centro do Barramento	40
3.13	Esforço de Flexão: Força Aplicada uniformemente pelo Barramento	41
3.14	Momento Resistente e Momento de Inércia - um barramento por fase	42
3.15	Momento Resistente e Momento de Inércia - dois barramentos por fase	43
3.16	Momento Resistente e Momento de Inércia - três barramentos por fase	43
3.17	Momento Resistente e Momento de Inércia - quatro barramentos por fase	44
3.18	Exemplo de uma malha utilizando o método dos elementos finitos. [6]	48
3.19	Exemplos da utilização do método dos elementos finitos. [7, 8, 9]	50
4.1	Caixas Modulares de Poliéster [3]	52
4.2	Armários Murais - ARIA [3]	53
4.3	Armários Murais - PolySafe [3]	53
4.4	Repartidores [3]	54
4.5	Armários Modula 630K [3]	55
4.6	Armários Modula Plus [3]	56
4.7	Sistema VP - Armários de solo e murais [3]	57
4.8	Suportes utilizados na gama industrial até os 630A de corrente nominal [3]	58
4.9	Formas de montagem de barramentos até 630 A (montados em cela e armário) [3]	59

4.10	Suportes para o sistema VP de armários [3]	60
4.11	Exemplos de montagem em armários de sistema VP	61
4.12	Exemplo de Montagem de Barramentos no armário Modula Plus [3]	61
4.13	Suporte Universal utilizado no armário Modula Plus	63
5.1	Diagrama do utilizador da Ferramenta desenvolvida	70
5.2	Ranuras de suporte para sustentação de barramentos.	71
5.3	Menu que Inicia a Ferramenta Desenvolvida	73
5.4	1ª Janela de Interface com o Utilizador	74
5.5	2ª Janela de Interface com o Utilizador	75
5.6	3ª Janela de Interface com o Utilizador	75
5.7	4ª Janela de Interface com o Utilizador	76
5.8	1º Gráfico da variação da força electrodinâmica.	78
5.9	Secção de Suporte dos barramentos	79

Lista de Tabelas

2.1	Resumo das medidas de protecção contra contactos directos e indirectos [10]	11
2.2	Resumo das medidas de protecção contra contactos directos [10]	12
2.3	Códigos de protecção contra penetração de corpos sólidos e líquidos [10]	18
2.4	Códigos de protecção contra as acções mecânicas [10]	19
3.1	Valores de Momento Resistente e Momento Inércia	45
3.2	Barramentos em Cobre Electrolítico [11]	46
4.1	Barramentos Verticais para o sistema VP de armários [3]	59
4.2	Barramentos Horizontais para o sistema VP de armários [3]	60
4.3	Secções de Barramentos GE para armários Modula Plus [3]	62

Capítulo 1

Introdução

É feita aqui uma apresentação do presente trabalho e aqui se pretende explicitar as condições e a forma como se conduziu e estruturou o mesmo.

Este é um capítulo onde será possível perceber qual o enquadramento do projecto, quais os seus objectivos, e qual foi a metodologia utilizada para os atingir.

1.1 Enquadramento do Projecto

O presente trabalho resulta de uma parceria efectuada entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e a General Electric Power Controls Portugal (GE).

A General Electric é uma multinacional americana fundada por Thomas Edison em 1879 quando inventou a primeira lâmpada de filamento. Desde então, a General Electric transformou-se num poderoso Grupo Industrial e Financeiro com mais de 300.000 colaboradores espalhados por todo o mundo.

A General Electric Consumer & Industrial tem mais de 110.000 produtos contando com mais de 25 Centros Fabris em 12 países. A Fábrica da General Electric Consumer & Industrial em Portugal situa-se em Vila Nova de Gaia.

A ‘Power Protection’ é uma divisão da GE ‘Consumer Industrial’, e é um dos negócios basilares da GE. É a divisão responsável pela distribuição de equipamentos de baixa tensão, que incluem mecanismos, equipamento modular e industrial, automatismos e controlo, quadros e armários, assim como soluções de engenharia para a automatização de processos industriais.

Sendo que esta dissertação se prende com a realização de um trabalho sobre projectos de quadros eléctricos de baixa tensão. Passa pela integração das soluções de baixa tensão, quadros e armários, com a instalação e dimensionamento dos barramentos e respectivos suportes.

Este projecto foi realizado em comunicação com as várias divisões da GE, desde o início, produção, até ao cliente final. Isto porque é um projecto que tem implicações e condicionantes que vão desde o processo produtivo até às próprias necessidades das instalações eléctricas. Ou seja, as regras que regem as instalações eléctricas acabam por ser condicionantes às formas produtivas e à própria forma de montagem dos quadros eléctricos.

1.2 Objectivos do Projecto

Pretende-se fazer um estudo das condicionantes e regras que regem as instalações eléctricas, e das implicações que isso têm nos quadros eléctricos, mais especificamente quanto ao tipo de invólucro e os seus respectivos índices de protecção.

Também se pretende efectuar um estudo dos tipos de armários existentes, das várias formas de montagem dos barramentos e sustentação destes.

Nesta perspectiva, pretende-se estudar as correntes de curto-circuito e os seus efeitos nos barramentos, mais propriamente nos suportes dos barramentos. Sendo um dos objectivos obter uma formulação matemática que permita obter tais efeitos. Esta formulação vai permitir que sejam calculados os esforços electrodinâmicos nos barramentos, definir qual o espaçamento entre suportes e também as forças realmente aplicadas nestes, tornando possível determinar quais as especificações produtivas que cada suporte deverá ter (pelo menos a nível de suporte dos esforços electrodinâmicos, provocados pelas correntes de curto-circuito).

Usando esta metodologia de cálculo, desenvolver-se-á uma ferramenta informática para projecto em quadros eléctricos de baixa tensão, ou seja, um software capaz de determinar quais os esforços e espaçamento dos suportes. Um software feito para todos os quadristas e instaladores.

Esta ferramenta pretende vir simplificar o projecto dos quadros eléctricos e vem trazer mais uma alavanca à GE no sentido de poder fornecer aos seus quadristas e instaladores um meio que os ajude no fabrico e montagem dos seus quadros. Mas pretende-se que esta ferramenta seja também uma ajuda à própria equipa da GE, porque será possível otimizar a utilização de suportes e de barramentos nos seus quadros eléctricos.

1.3 Metodologia de Trabalho

A metodologia de trabalho que regeu o desenvolvimento desta dissertação pode ser dividido em quatro etapas.

- *1ª Etapa* - Análise à bibliografia existente sobre os assuntos em estudo;
- *2ª Etapa* - Escrita do estado da arte, de forma a consolidar a teoria que sustenta a realização do projecto;

- *3ª Etapa* - Desenvolvimento de um algoritmo de cálculo que permita uma generalização a todos os casos de projecto, cumprindo com todas as normalizações feitas no mercado e na produção;
- *4ª Etapa* - Desenvolvimento da ferramenta para projecto de quadros eléctricos de baixa tensão. Trata-se de um software em Visual Basic, com base em folhas de cálculo em Excel;
- *5ª Etapa* - Teste da ferramenta, por parte do autor e da equipa da GE;
- *6ª Etapa* - Conclusão da escrita da parte prática e, portanto, da presente dissertação.

1.4 Estrutura da Dissertação

Para além da introdução, esta dissertação contém mais cinco capítulos.

No capítulo 2, analisam-se generalidades, condicionantes e normas que regem a construção de quadros eléctricos de baixa tensão. Faz-se ainda uma análise dos índices de protecção e das classes das instalações eléctricas, enquadrando este estudo com a concepção dos quadros eléctricos. É feita também uma análise de normas de referência.

No capítulo 3, é feita uma análise sobre trabalhos já realizados na área, tentando ilustrar quais os precedentes ao estudo efectuado durante este projecto, mais especificamente quanto aos métodos de cálculo.

No capítulo 4, tenta-se fazer um resumo, em forma de descrição, que explicita todas as soluções existentes na GE, de armários, barramentos e respectivos suportes. Fazendo uma análise das suas aplicações e formas de montagem, tentando enquadrar essas particularidades nos objectivos desta dissertação.

No capítulo 5, apresenta-se a ferramenta/software desenvolvida, a qual permite o cálculo de forças electrodinâmicas e esforços nos suportes dos barramentos, permitindo um dimensionamento do espaçamento entre estes suportes. É apresentado também um caso prático analisado à luz das considerações definidas nesta dissertação.

No capítulo 6, é apresentada uma conclusão/síntese do trabalho, sendo também feita uma referência à perspectiva de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Quadros Eléctricos de Baixa Tensão

Este capítulo serve o propósito de apresentar as soluções existentes em quadros eléctricos, focando essencialmente as soluções relativas a invólucros industriais. As regras que regem as instalações eléctricas serão enquadradas tendo em vista tais equipamentos.

Pretende-se também que o projecto esteja enquadrado com as normas, fazendo estas, portanto, parte da pesquisa realizada.

2.1 Generalidades sobre Quadros Eléctricos

Esta secção, pretende ilustrar o que são os quadros eléctricos, analisando quais as suas funções, requisitos, aspectos gerais de dimensionamento e, também, os tipos de quadros que existem.

2.1.1 Função

Os quadros eléctricos são um conjunto de equipamentos, têm na sua constituição grupos variados de equipamentos eléctricos de protecção, comando e/ou controlo da instalação em que estejam inseridos.

Os quadros eléctricos de baixa tensão são a materialização do projecto eléctrico, enquanto que as características do equipamento que os constituem são a manifestação dos dimensionamentos elaborados no projecto da instalação eléctrica.

“Os quadros eléctricos são conjuntos de equipamentos, convenientemente agrupados, incluindo as suas ligações, estruturas de suporte e invólucro, destinado a proteger, a comandar ou a controlar as instalações eléctricas.” [12]

A constituição dos quadros é composta pelos diversos equipamentos que fazem parte da sua concepção e também pelo invólucro. O tema referente aos invólucros será aprofundado numa fase posterior. Quanto aos equipamentos que constituem os quadros eléctricos são os seguintes:

- Dispositivos de Protecção Contra Sobreintensidades;
- Dispositivos de Protecção Contra Contactos Indirectos;
- Aparelhos de Comando;
- Aparelhos de Seccionamento;
- Aparelhos de Sinalização.

A protecção contra choques eléctricos é notoriamente uma das maiores preocupações no projecto e, consequentemente, na concepção dos quadros eléctricos. A lógica da protecção visa principalmente a protecção dos utilizadores. Assim, os utilizadores encontram-se protegidos, porque actualmente a protecção contra os contactos directos e indirectos é realizada segundo um conjunto de regras que regulamentam essas mesmas protecções. Ainda antes da explicitação dos referidos requisitos, vai-se tentar explicar, quais as divisões por classes que classificam os equipamentos, já que várias referências a estas classes serão feitas ao longo do texto. Assim, nas Regras Técnicas de Instalações Eléctricas de Baixa Tensão [12], as classes estão definidas da seguinte forma:

- **Classe I** - Equipamento em que a protecção contra os choques eléctricos não é garantida, apenas pelo isolamento principal. Para os equipamentos da *classe I* é prevista uma medida de segurança complementar, por meio da ligação das partes condutoras acessíveis a um condutor de protecção ligado à terra e que faça parte das canalizações fixas, por forma a que as partes condutoras acessíveis não possam tornar-se perigosas em caso de defeito do isolamento principal;
- **Classe II** - Equipamento em que a protecção contra os choques eléctricos não é garantida, apenas, pelo isolamento principal. Para os equipamentos da *classe II* são previstas medidas complementares de segurança, tais como o duplo isolamento ou o isolamento reforçado. Estas medidas não incluem meios de ligação à terra de protecção e não dependem das condições de instalação;
- **Classe III** - Equipamento em que a protecção contra os choques eléctricos é garantida por meio de uma alimentação à tensão reduzida de segurança (TRS) ou à tensão reduzida de protecção (TRP).

2.1.2 Requisitos

Os requisitos que regem estes equipamentos são legislados e normalizados. Vai-se tentar enquadrar o projecto de acordo com as normas portuguesas.

Os requisitos a que estes equipamentos "obedecem" referem-se também aos seus aspectos gerais de dimensionamento, que implicam regras que terão que ser respeitadas na sua concepção e projecto.

Mas quando se fala de requisitos para estes equipamentos, fala-se nomeadamente de:

- Protecção das Instalações;
- Protecção de Pessoas.

Nos diferentes tipos de protecção das instalações, são de referir as condições de protecção contra curto-circuitos. É de referir a utilização de fusíveis e disjuntores, convenientemente dimensionados, com o intuito de se obter uma protecção efectiva contra este tipo de defeito. Esta característica dos equipamentos prende-se com a sua capacidade de actuarem de forma a proteger tanto a instalação como a si próprios. Esta característica é aquilo a que se chama de *poder de corte* [10].

Esta designação é a definição, obviamente, utilizada pelos fabricantes, mas é também a designação utilizada em projectos de engenharia de instalações eléctricas.

O valor do poder de corte é especificado com base no cálculo efectuado para o valor de curto-circuito calculado em cada projecto.

Ocorre um curto-circuito quando a energia eléctrica encontra um caminho de retorno com menor resistência que aquele que encontraria passando normalmente por um aparelho. Esse novo caminho não é necessariamente o mais curto, em termos de distância, mas sim em termos de menor resistência.

Se dois condutores entrarem em contacto (fase e neutro, por exemplo) não havendo um aparelho por onde circule a energia, mas sim um percurso de muito baixa resistência, a corrente torna-se intensa, colocando em perigo a instalação. Ocorreu o que denominamos de curto-circuito, ou seja, o "circuito" (percurso) não passa pelo aparelho alimentado (grande resistência), mas vai directamente ao retorno (quase nenhuma resistência).

O dimensionamento das correntes de curto-circuito será explorado num capítulo seguinte da presente dissertação, embora as condicionantes ao cálculo deste valor possam ser muito variadas. Talvez a maior condicionante a esse cálculo seja a potência e o tipo de fonte de alimentação.

"Os quadros de manobra/distribuição devem ser dimensionados para os esforços devidos a curto-circuitos previstos para o local considerado." [2].

A obtenção do valor da corrente de curto-circuito (I_{cc}) é importante, e a sua forma de obtenção pode ser tanto analítica como prática, ou seja, pode ser aplicado um algoritmo teórico de cálculo ou então efectuar uma medição directa da mesma.

Os equipamentos de protecção têm então de se encontrar em conformidade com este valor de I_{cc} , e têm, obrigatoriamente, de estar dimensionados (de forma a cumprir o valor de poder de corte estipulado.) com um poder de corte compatível.

O defeito inerente ao I_{cc} está directamente ligado a um aumento de temperatura violento nos condutores, pelo que facilmente se entende que os dispositivos têm que actuar em tempo reduzido, de forma a que o aumento de temperatura não ultrapasse o limite suportado pelo isolamento do condutor.

Falou-se anteriormente da importância da protecção de pessoas, os utilizadores, em instalações eléctricas. Assim, no que se refere à protecção de pessoas, animais e dos bens contra os perigos e danos que podem resultar da utilização de instalações eléctricas, existem os seguintes tipos de protecção, consoante o tipo de riscos existentes [12]:

- Protecção contra os choques eléctricos;
 1. Protecção contra contactos directos;
 2. Protecção contra contactos indirectos.
- Protecção contra os efeitos térmicos;
- Protecção contra sobreintensidades;
- Protecção contra as correntes de defeito;
- Protecção contra as sobretensões.

“A escolha do tipo de construção para uma instalação de manobra é orientada principalmente pela classe de protecção requerida, relativamente à protecção contra contactos directos e contra a entrada de corpos estranhos. As considerações referentes à manutenção de rotina e fácil utilização podem também constituir factor de decisão no tipo de construção. (...) O adjudicatário responsável pela montagem do equipamento deverá verificar se a construção escolhida satisfaz às exigências de segurança para o local previsto.” [2]

Referem-se assim, devido à sua importância na segurança dos utilizadores e na definição dos quadros eléctricos, os choques eléctricos, defeito este que pode causar electrocussão e que ocorre quando o corpo humano entra em contacto com superfícies condutoras a potenciais diferentes [13]. Existem, então, dois tipos de contactos, já antes referidos, que provocam a electrocussão - o contacto directo e o contacto indirecto.

Pode-se dizer que o contacto directo, representado na Figura 2.1, ocorre quando uma pessoa toca acidentalmente numa parte em tensão da instalação que não esteja ligada a um eléctrodo de terra. Nesta situação, a pessoa torna-se parte do circuito eléctrico por intermédio da resistência do corpo e da resistência da terra.

Quando se fala de contactos indirectos, representados na Figura 2.2, está-se a referir a situação em que uma pessoa toca numa parte metálica do equipamento, estando essa

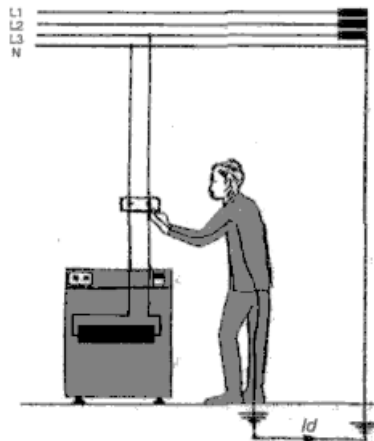


Figura 2.1: Contacto Directo [1]

parte ligada à terra, e acidentalmente há um contacto com um condutor eléctrico devido a um defeito de isolamento.

Existem formas de evitar estes contactos, mas para garantir a protecção individualizada a cada um desses tipos de contactos e outras que garantem uma protecção simultânea contra contactos directos e indirectos.

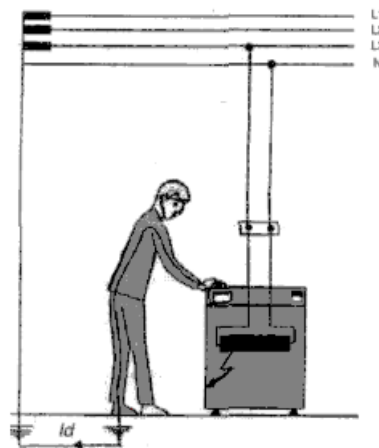


Figura 2.2: Contacto Indirecto [1]

A protecção contra choques eléctricos deverá ficar assegurada aplicando os conceitos, de acordo com a norma IEC 60364-4-43 [14], de protecção utilizando muito baixa tensão, portanto, capaz de efectuar protecção simultânea a ambos os tipos de contacto [10, 12]:

1. TRS - Tensão Reduzida de Segurança;

2. TRP - Tensão Reduzida de Protecção, isto é, tensão reduzida de segurança, com um ponto do circuito secundário ligado à terra (e satisfazendo todas as outras condições de TRS);
3. TRF - Tensão Reduzida Funcional, isto é, tensão reduzida que não obedece nem às regras da TRS nem às regras da TRP.

As regras gerais que regem a protecção por tensão reduzida estão explicitados na Tabela 2.1.

Na protecção contra contactos directos podem-se referir as seguintes formas de protecção:

- Isolar os condutores com materiais apropriados;
- Utilizar barreiras ou invólucros com um IP adequado;
- Concepção da instalação tendo em conta distâncias de segurança adequadas;
- Protecção complementar através da utilização de dispositivos diferenciais.

O resumo às medidas de protecção contra os contactos directos encontram-se sintetizados na Tabela 2.2 da página 12.

Na protecção contra contactos indirectos existem diferentes métodos de protecção:

Utilização de materiais que assegurem uma protecção classe II.

Esta definição, prende-se com equipamentos dotados de duplo isolamento ou com isolamento total. Isto implica um emprego de materiais de maior capacidade de isolamento na construção dos quadros eléctricos.

Protecção em ambientes não condutores.

Todas as partes ou componentes condutores desprotegidos devem estar de forma a impedir que qualquer pessoa possa tocar em qualquer parte ou componente em tensão. Esta instalação não requer nenhum condutor de protecção.

Protecção mediante isolamento (galvânico) eléctrico.

Implica utilização de transformadores de isolamento.

Protecção mediante desconexão automática da instalação.

Necessária nos casos em que existe risco de efeitos fisiológicos nas pessoas devido à magnitude e duração da tensão de contacto. Este tipo de protecção requer uma boa coordenação entre as ligações à terra, as características do condutor de protecção e o dispositivo de protecção.

Tabela 2.1: Resumo das medidas de protecção contra contactos directos e indirectos [10]

Medidas de Protecção Simultânea contra os Contactos Directos e Indirectos	
TRS - Tensão reduzida de segurança ou TRP - Tensão reduzida de protecção	TRF - Tensão reduzida funcional
1) Tensões $U \leq 50$ V c.a. Ou $U \leq 120$ V c.c. ;	
2) Fonte de alimentação a) Transformador de segurança - Norma EN 61558 ou transformador equivalente; b) Pilhas ou acumuladores; c) Dispositivos electrónicos.	2) Fonte de alimentação a) Transformador de tensão reduzida; b) Pilhas ou acumuladores; c) Dispositivos electrónicos.
3) Condições de Instalação dos circuitos: a) As partes activas de tensão reduzida devem ser electricamente separadas de outros circuitos, por isolamento equivalente ao que existe entre o primário e o secundário do transformador; b) Os condutores de todos os circuitos de tensão reduzida devem ser fisicamente separados dos condutores de todos os outros circuitos.	
3) Fichas e tomadas devem satisfazer as condições seguintes: a) As fichas não devem poder entrar em tomadas de outras tensões; b) As tomadas devem impedir a introdução de fichas de outras tensões; c) As tomadas alimentadas por TRS não devem possuir contacto de terra.	3) Fichas e tomadas devem satisfazer as condições seguintes: a) As fichas não devem poder entrar em tomadas de outras tensões; b) As tomadas devem impedir a introdução de fichas de outras tensões;
4) As massas dos equipamentos alimentados a TRS não podem ser ligadas à terra, nem a condutores de protecção ou massas ou elementos condutores de outras instalações.	4) As massas dos equipamentos alimentados a TRF devem ser ligadas: a) ao condutor de protecção do circuito primário, se neste for usada uma das medidas de protecção por corte automático; b) ao condutor de equipotencialidade do circuito primário, não ligado à terra, se no primário for usado o método de protecção por separação eléctrica.
5) Protecção contra contactos directos Para tensões compreendidas nos limites $25 < U \leq 50$ a protecção contra contactos directos deve ser garantida por: a) barreiras ou invólucros com IPXXB (protecção contra a penetração de dedos); ou b) isolamento que suporte 500 Volt durante 1 minuto.	5) Protecção contra contactos directos A protecção contra contactos directos deve ser garantida por: a) barreiras ou invólucros com IPXXB (protecção contra a penetração de dedos); ou b) por isolamento correspondente à tensão mínima exigida para o primário.

Tabela 2.2: Resumo das medidas de protecção contra contactos directos [10]

Medidas de Protecção Contra os Contactos Directos			
Por isolamento (Aplicáveis a todas as condições de influências externas)	Por barreiras ou obstáculos (Aplicáveis apenas em locais acessíveis a pessoas qualificadas ou instruídas)	Por colocação fora alcance (Aplicáveis apenas em locais acessíveis a pessoas Qualificadas ou Instruídas)	Por protecção complementar com dispositivo diferencial
1) Todas as partes activas devem ser completamente isoladas, por isolamento que apenas se possa retirar por destruição;	1) As partes activas devem ser colocadas dentro de invólucros ou por trás de barreiras com IP \geq IP2X (aberturas de dimensão inferior a 12,5 mm);	1) As partes activas não se devem situar no volume de acessibilidade;	A protecção complementar por dispositivo diferencial de alta sensibilidade $I_{\Delta n}=30\text{mA}$, deve ser usada como efectivo complemento de qualquer uma das outras medidas, não podendo ser considerada por si só uma medida suficiente.
	2) Se não for possível cumprir o preceituado em 1) deve:		
2) Os isolamentos de equipamentos montados em fábrica devem satisfazer às regras aplicáveis a esses;	a) tomar-se precauções para impedir que as pessoas e os animais toquem acidentalmente nas partes activas;	2) O volume de acessibilidade pode ser condicionado por obstáculo, na horizontal, mantendo-se na vertical o afastamento de 2,5 m.	De referir que estas medida não evita acidentes em que o contacto é bipolar (entre fases e entre fase e neutro), pelo que se torna importante a aplicação correcta das outras medidas referenciadas.
	b) garantir que as pessoas estejam conscientes de que as partes que fiquem acessíveis pela abertura são partes activas;		
3) Os equipamentos não montados em fábrica devem ser dotados de protecção que suporte, de forma durável, as solicitações a que possam vir a ser submetidas.	3) Pisos e passadeiras colocados por cima de partes activas devem ter um IP com IP \geq IP4X;		
	4) As barreiras e os invólucros devem ser fixados de forma segura e terem robustez e durabilidade para manterem o grau de protecção exigido;		
	5) Os obstáculos devem impedir:		
	a) A aproximação física, não intencional, às partes activas;		
	b) Os contactos não intencionais com as partes activas durante a exploração.		

2.1.2.1 Normas Aplicáveis

As regras fundamentais que regem a montagem e o fabrico de quadros eléctricos inscrevem-se na norma internacional IEC 439-1 [15]. Esta norma refere-se a quadros eléctricos de baixa tensão e aos equipamentos que dele fazem parte.

São também de destacar as normas que regulam os índices de protecção dos quadros eléctricos. As normas que os regulamentam são a norma internacional IEC 60529 [16] (índice IP) e norma internacional IEC 62262 [17] (índice IK).

2.1.2.2 Aspectos Gerais de Dimensionamento

Na concepção do que deverá ser um quadro eléctrico para uma determinada instalação é necessário tomar em consideração diversos factores. Tenta-se focar alguns dos pontos principais a ter em conta.

Um dos factores de maior preponderância é a possível expansão das instalações eléctricas, pelo que se deve prever uma correcta constituição de reservas, idealmente representando 30 % de margem para ampliação da instalação futura.

Uma das características mais importantes na concepção de um quadro eléctrico é garantir, em todas as situações, a instalação de um aparelho de corte de entrada. Todos os quadros exigem a instalação de repartidores de energia.

O outro factor que influencia grandemente o dimensionamento geral dos quadros eléctricos é a sua localização na instalação, visto que esta condiciona a escolha do invólucro. Na realidade, os índices de protecção do invólucro (IP - Índice de Protecção contra a Penetração de sólidos ou líquidos; IK - Índice de Protecção contra choques mecânicos) são dependentes das características do local da instalação. Por isso, é necessário fazer escolhas criteriosas quanto à localização dos quadros eléctricos, de forma a otimizar a instalação a todos os níveis, técnicos e de custo.

“A construção de instalações de manobra e quadros de distribuição está, na sua grande parte, subordinada aos requisitos impostos por questões locais. Estes requisitos serão em muito maior número se o equipamento estiver junto ao centro de consumo. As soluções a adoptar devem, portanto, ser cuidadosamente analisadas na fase de planificação. ” [2].

Na concepção de um quadro, a protecção das massas influencia na obrigatoriedade de existência de um barramento ou terminal para esse efeito.

Têm que existir também preocupações a nível da selectividade da instalação, ou seja, os circuitos existentes em cada quadro deverão ser dimensionados, com ponderação neste factor.

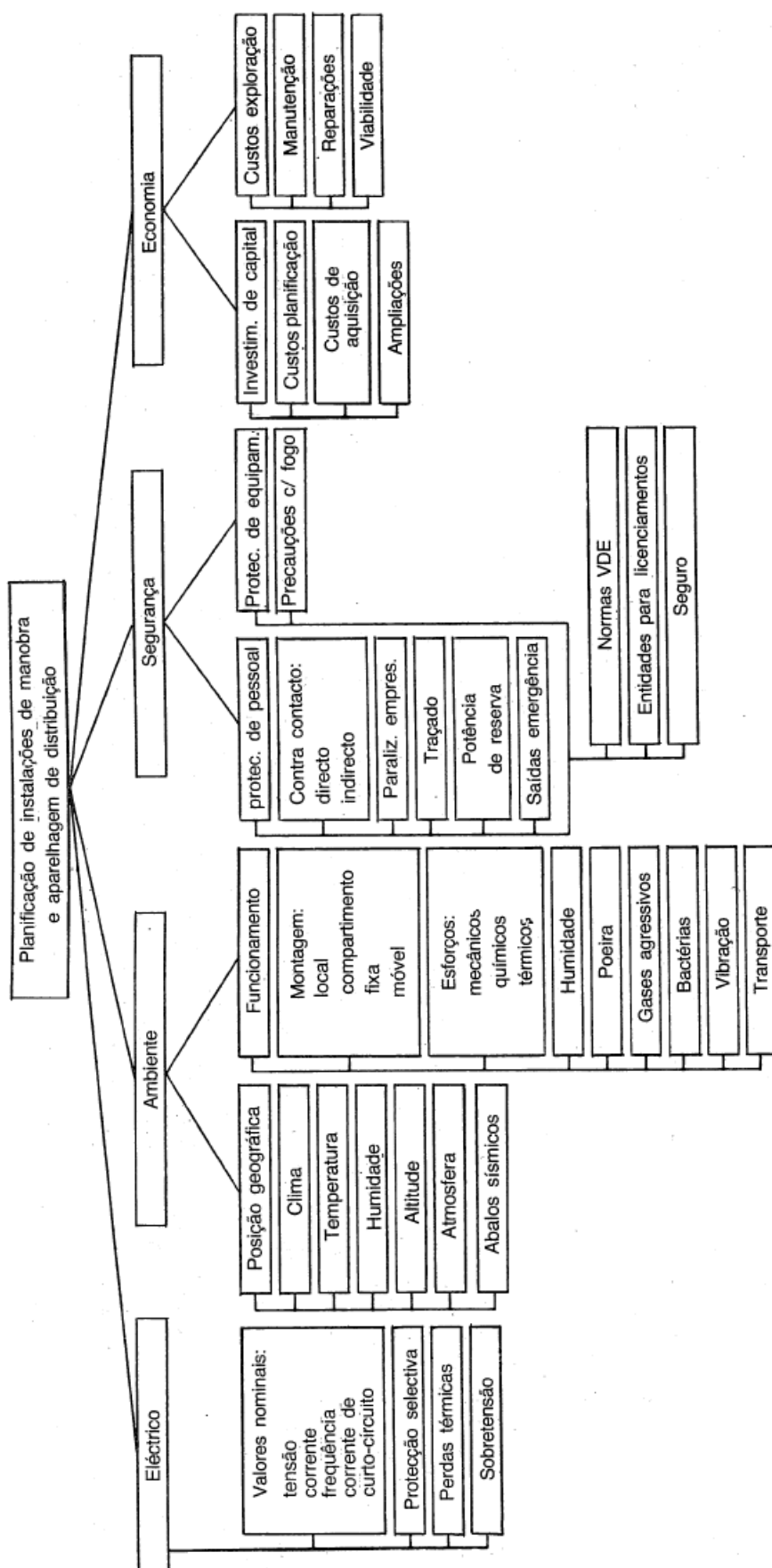


Figura 2.3: Planificação de instalações de manobra e aparelhagem de distribuição [2]

Falta perceber que, em algumas instalações, as exigências térmicas podem ser muito elevadas. Assim, a ventilação deverá ser tida em conta, sendo ponderada a solução de ventilação forçada para casos em que se prevejam temperaturas, de funcionamento normal, elevadas.

Tendo referido alguns dos pressupostos de maior importância, é possível ver quais as concionantes à planificação de instalações de manobra e aparelhagem de distribuição, analisando o diagrama da figura 2.3.

2.1.3 Tipos

“Em virtude da diversidade de procura de quadros de manobra e distribuição para baixa tensão, torna-se necessário, por razões económicas, proceder à sua normalização, limitando-os a um reduzido número de arranjos, a despeito da grande variedade de exigências a que o equipamento tem de satisfazer. A decisão sobre o tipo a escolher depende das circunstâncias locais, quanto a instalação e utilização e, ainda, da finalidade e rigos das especificações eléctricas.” [2].

Existem diversos tipos construtivos de quadros eléctricos [18], destacando-se os seguintes:

- Quadro Aberto;
- Quadro de Painéis;
- Quadro de Armário;
- Quadro de Caixas.

No entanto, visto que este projecto se centra primordialmente em instalações eléctricas industriais, adquirem especial importância os quadros de armário.

Estes podem ainda ser dos seguintes tipos:

- Armários Murais, representados visualmente na Figura 2.4;
- Armários de Solo, representados visualmente na Figura 2.5;
- Armários Subterrâneos, representados visualmente na Figura 2.6.

2.2 Invólucros

Os *invólucros* são umas das partes constituintes dos quadros eléctricos e têm como principal função a protecção dos utilizadores das instalações onde estarão instalados, assim como dos equipamentos constituintes do quadro em questão.

“O invólucro tem por missão proteger os utilizadores contra choques eléctricos e proteger os equipamentos contra os riscos devidos à envolvente.” [19]



Figura 2.4: Armários Murais [3]

2.2.1 Normas Aplicáveis

Grande parte das condicionantes à aplicação de invólucros encontram-se fixadas no *R.T.I.E.B.T.* [12], pelo que se extraem aqui alguns artigos relevantes do mesmo.

Artigo 413.2.2 (Parte 4 - Secção 41) - Com o equipamento eléctrico em funcionamento, todas as partes condutoras que estejam apenas separadas das partes activas por um isolamento principal devem ser colocadas no interior de um invólucro isolante que possua um código IP não inferior a IP2X.

Artigo 413.2.3 (Parte 4 - Secção 41) - O invólucro isolante deve ser capaz de suportar as solicitações mecânicas, eléctricas e térmicas susceptíveis de se produzirem.

Artigo 413.2.6 (Parte 4 - Secção 41) - Quando o invólucro tiver portas ou tampas que possam ser abertas sem a ajuda de uma ferramenta ou de uma chave, todas as partes condutoras que fiquem acessíveis quando a porta ou a tampa estiverem abertas devem ser



Figura 2.5: Armário de Solo [3]

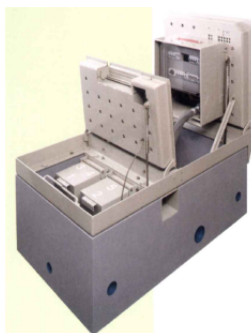


Figura 2.6: Armário Subterrâneo [3]

protegidas por uma barreira isolante que tenha um código IP não inferior a IP2X. Esta barreira isolante, destinada a impedir que as pessoas possam tocar acidentalmente nessas partes condutoras, so deve poder ser retirada com a ajuda de uma ferramenta.

Artigo 413.2.8 (Parte 4 - Secção 41) - O invólucro não deve prejudicar as condições de funcionamento do equipamento por ele protegido.

No caso dos invólucros, as normas aplicáveis referem-se aos seus índices de protecção IP e IK. Estes índices de protecção são regulados, no caso do IP, pela norma NP EN 60529, baseada na norma internacional IEC 60529 [16], e no caso do IK, pela norma EN 50102, baseada na norma internacional IEC 62262 [17].

“(...) a selecção dos elementos constituintes de uma instalação eléctrica e a sua execução, e subsequente verificação, são dois dos quatro princípios considerados fundamentais pelas regras técnicas.” [19]

Pode-se portanto dizer que a selecção dos invólucros tem que garantir a protecção dos equipamentos em que são usados, neste caso específico dos quadros eléctricos, e têm também que garantir a protecção de pessoas.

O código IPXX é caracterizado por dois algarismos (‘X’) relativos às influências externas onde o equipamento será instalado. O primeiro algarismo refere-se à protecção contra a penetração de corpos sólidos estranhos e varia entre 0 e 6, sendo que o índice de protecção aumenta por ordem crescente. O segundo algarismo é referente à protecção contra a penetração de água, com uma variação entre 0 e 8, também com um índice que aumenta por ordem crescente. Serão mais facilmente perceptíveis os códigos contra penetração de corpos sólidos e líquidos por análise da Tabela 2.3 da página 18, retirada de [10].

O índice protecção IPXX têm ainda duas letras que podem acrescer ao seu código base (IPXX‘YY’), podendo a primeira letra tomar as designações A, B, C ou D, que são referentes (à protecção contra o acesso de pessoas a partes perigosas):

- A - Acesso das costas da mão protegido;

Tabela 2.3: Códigos de protecção contra penetração de corpos sólidos e líquidos [10]

Códigos de Protecção Contra a Penetração de Corpos Sólidos e Líquidos				
Códigos IPX1X2				
Codigo	Algarismo X1		Algarismo X2	
	Nº	Significado	Nº	Significado
IPX1X2	0	Não Protegido	0	Não Protegido
	1	Protegido contra penetração de corpos sólidos de diâmetro maior que 50 mm	1	Protegido contra as quedas de gotas de água na vertical
	2	Protegido contra a penetração de corpos sólidos de diâmetro maior que 12 mm	2	Protegido contra as quedas de gotas de água até 15º de inclinação em relação à vertical
	3	Protegido contra penetração de corpos sólidos de diâmetro maior que 2,5 mm	3	Protegido contra a água da chuva até 60º de inclinação em relação à vertical
	4	Protegido contra penetração de corpos sólidos de diâmetro maior que 1 mm	4	Protegido contra as projecções de água em todas as direcções
	5	Protegido contra penetração de poeiras sem depósito prejudicial	5	Protegido contra jactos de água em todas as direcções
	6	Estanque às poeiras	6	Protegido contra jactos de água fortes e massas de água de ondas
			7	Protegido contra os efeitos de imersão temporária
			8	Protegido contra os efeitos prolongados de imersão

Tabela 2.4: Códigos de protecção contra as acções mecânicas [10]

Códigos de Protecção Contra as Acções Mecânicas			
Códigos IKXX			
Código	Algarismo XX	Energia de impacto Protegida	Massa de Corpo (em gramas) que produz a energia do impacto numa queda de 1 metro de
IKXX	00	Não protegido	-
	01	0,15 joule	15
	02	0,20 joule	20
	03	0,35 joule	35
	04	0,50 joule	50
	05	0,70 joule	70
	06	1,00 joule	100
	07	2,00 joule	200
	08	5,00 joule	500
	09	10,00 joule	1000
	10	20,00 joule	2000

- B - Acesso de dedo da mão protegido;
- C - Acesso de ferramenta com diâmetro de 2,5 m protegido;
- D - Acesso de fio com 1 mm de diâmetro protegido.

A segunda letra pode tomar as designações H, M, S ou W, que significam:

- H - Equipamento de alta tensão;
- M - Equipamento em movimento durante o ensaio com água;
- S - Equipamento parado durante o ensaio com água;
- W - Equipamento sujeito a intempéries.

O invólucro não deve mostrar nenhum defeito que coloque em causa o grau de protecção definido por IPXX [3].

O código IKXX é também caracterizado por um grupo de algarismos ('XX'). Este índice e algarismos (00 a 10) são relativos à protecção contra os choques mecânicos. A indicação do significado numérico dos índices consulta-se facilmente na Tabela 2.4, retirada de [10].

2.2.2 Tipos de Invólucros

Os tipos de invólucros existentes, segundo as pesquisas efectuadas aos vários fabricantes de invólucros para quadros eléctricos, são divididos em dois tipos.

- Invólucros Metálicos;

- Invólucros de Poliéster;

A escolha dos diferentes tipos de invólucros refere-se essencialmente ao tipo de utilização/instalação. Existem obviamente diferenças referentes aos custos que os distintos tipos de soluções implicam.

Sabe-se que, em Portugal, e segundo o *R.T.I.E.B.T.* [12], existe obrigatoriedade de a classificação das instalações eléctricas residenciais ser de *classe II*. No sector terciário e industrial, poderão ser dimensionados como de *classe I*.

A superioridade da *classe II* em relação à *classe I* consiste na (maior) garantia contra contactos directos, já que obriga à existência de isolamento duplo. Assim, entende-se que um quadro metálico não têm protecção contra contactos directos, o que pode colocar limitações ao seu uso.

Foram encontradas duas soluções técnicas que visam a resolução deste problema. Neste caso uma das soluções é a fabrico do invólucro em poliéster, garantindo imediatamente a *classe II* de isolamento. No caso da manutenção da construção do invólucro em metal, têm que se manter o chassis devidamente isolado, com chassis de fixação de cabos e bornes completamente isolados para assim se garantir a *classe II*. Em ambas as soluções, os espelhos utilizados nos quadros eléctricos terão que ser, no primeiro caso, em poliéster, e no segundo, em plástico.

Existe também a possibilidade de, utilizando um invólucro de *classe I*, instalar um equipamento diferencial à entrada que efectue o corte geral da instalação, tornando-a numa instalação de *classe II*.

Resta apenas perceber o porquê de não utilizar sempre o invólucro de *classe I* com equipamento diferencial à entrada. Isto prende-se com a sensibilidade do projectista, pois as soluções que permitem *classe II* não contemplando esta protecção diferencial à entrada, são obviamente mais dispendiosas. No entanto, independentemente da ocorrência do defeito, não provocam o disparo de todo o quadro, mantendo a protecção contra os contactos directos, sem provocar o desligar de toda a instalação.

A escolha do invólucro a utilizar deve ser ponderado por análise dos factores condicionantes do projecto.

2.3 Conclusão

No presente capítulo, tentou-se fazer uma apresentação do que são os quadros eléctricos de baixa tensão. É na envolveria das regras referentes às instalações eléctricas de baixa tensão que estão inseridas as que se aplicam a estes equipamentos. Tentou-se entender e perceber as ideias fundamentais que se prendem com o dimensionamento destes equipamentos, e quais as condicionantes a ter em conta.

Estudaram-se também os vários tipos de contactos e as formas de protecção contra a ocorrência de defeitos.

Foi também feita uma apresentação da generalidade dos armários, da sua forma construtiva, tendo sido enfatizados os índices de protecção (IP e IK). Estudaram-se quais os tipos de invólucros existentes e o porquê da sua existência, nomeadamente quanto à classe de instalação em que se inserem (ex: *classe II*).

Capítulo 3

Curto-Circuitos e Esforços Electrodinâmicos

3.1 Curto-Circuitos

Os curto-circuitos são os defeitos que mais frequentemente ocorrem na rede eléctrica, tem como consequência aquecimento dos condutores e a deterioração irreversível do equipamento, esforços electrodinâmicos entre equipamentos adjacentes e quedas de tensão muito elevadas nas fases envolvidas e com elevações nas restantes [20]. Portanto, é imprescindível a protecção contra curto-circuitos. Como já foi dito, a determinação das características dos equipamentos utilizados nas instalações eléctricas advém da necessidade de estes suportarem ou terem a capacidade para cortar a corrente de defeito.

Dos defeitos passíveis de ocorrerem nas instalações eléctricas, estes são aqueles que mais danos podem provocar. Além do forte aquecimento que provocam nas canalizações eléctricas, estes defeitos levam ao desenvolver de esforços electrodinâmicos, sendo que estes esforços são notoriamente reconhecidos como extremamente prejudiciais a máquinas e barramentos.

“Em cabos subterrâneos, transformadores e máquinas rotativas, os curto-circuitos resultam de defeitos no isolamento dos condutores, devidos à deterioração das suas propriedades físicas, causadas por temperaturas excessivas ou campos eléctricos demasiado intensos.” [21].

Existem na realidade quatro tipos de curto-circuito: [4]

1. **Curto-Circuitos Assimétricos:** são os CC que envolvem apenas uma fase (fase-terra) ou duas fases (fase-fase, fase-fase-terra); [20]

- *fase-terra*: sendo que a ocorrência deste tipo de defeito específico corresponde a cerca de 70 a 85% de todos os defeitos ocorridos. Apesar de serem os mais frequentes, são também os de menor magnitude;
- *fase-fase*: estes defeitos correspondem a cerca de 8 a 15% de todos os defeitos existentes, sendo que normalmente degeneram num curto-circuito trifásico;
- *fase-fase-terra*: este defeito é o mais grave dos assimétricos, com uma ocorrência de 4 a 10%.

2. **Curto-Circuitos Simétricos**: são os CC que envolvem três fases com uma impedância de defeito igual em todas as fases. Se a impedância de defeito for nula designa-se de CC franco. [20]

- *Trifásico*: com uma baixa taxa de ocorrência, entre os 3 e os 5%. Sendo que correspondem ao pior defeito, com correntes de elevada magnitude.

Para o projecto desenvolvido, apenas as correntes de curto-circuito máximas são de relevância, visto que serão estas que levarão à determinação dos esforços electrodinâmicos máximos e, como referência, também à escolha do poder de corte dos disjuntores. Entende-se que o valor máximo de corrente é dado pela corrente de pico, I_p , e deve ser este valor que servirá para avaliar os efeitos electrodinâmicos que a instalação deve suportar [22, 4].

Nesse sentido, apresentam-se nos pontos seguintes as formas de cálculo de cada tipo de curto-circuito existente.

3.1.1 Simétricos

Como antes referido, os curto-circuito simétricos, são os trifásicos. Depreende-se mesmo, e até pelo nome, que são defeitos que afectam as três fases. São considerados simétricos visto que a impedância de defeito é a mesma para todas as fases. Existe ainda a designação de curto-circuito franco, no caso de a impedância de defeito ser zero.

3.1.1.1 Curto-Circuito Trifásico

Para o cálculo deste tipo de curto-circuito é necessário, antes de tudo, supor a existência de uma impedância de defeito, que normalmente é referenciada como Z_d ou como Z_{def} , sendo esta impedância “colocada” no local de defeito.

Em seguida, e supondo uma rede emalhada, o cálculo da corrente de curto-circuito parte da utilização do teorema da sobreposição, aplicando-se uma fonte de tensão no local de defeito, com uma tensão de pré-defeito de forma a que a tensão nesse ponto seja 0V. No caso da existência de geradores, estes terão que ser substituídos pela sua impedância interna. No caso de existir uma ligação à rede, esta terá também que se tornar num gerador da rede emalhada, sendo que se terá que obter a sua impedância equivalente. O cálculo do I_{cc} é então feito pela aplicação do teorema de Thévenin [21].

Num caso prático, percebe-se a dificuldade de aplicação desta forma de cálculo. Imaginando uma rede emalhada com muitos nós de análise, a redução do sistema a uma impedância equivalente é uma tarefa difícil e complexa. Assim, estruturaram-se outras formas de cálculo que pretendem simplificar este problema.

Aqui tentar-se-á apresentar o método sistemático para o cálculo das correntes de curto-circuito [21].

No final resultarão as expressões que permitem obter as correntes de curto-circuito. Para análise teórica e com carácter genérico suponha-se uma rede com 'nxn' nós ou pontos nodais.

Assim para a modelização da forma de cálculo, é necessário obter a matriz $[Z]$ das impedâncias nodais, equação 3.1. Esta matriz é inversa da matriz das admitâncias nodais $[Y]$.

$$[Z] = [Y]^{-1} \quad (3.1)$$

A matriz das impedâncias é constituída pela impedância existente entre os diversos barramentos da rede, a diagonal da matriz é referente às impedâncias relativas à terra [23].

A matriz das admitâncias referida anteriormente é obtida como explicitado em seguida.

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1k} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{k1} & \dots & Y_{kk} & \dots & Y_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nk} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Sendo que os respectivos termos obtém-se da seguinte forma [20]:

$$Y_{ik} = -y_{ik}, i \neq j;$$

$$Y_{ii} = \sum_{k \neq i} y_{ik} + y_{shi} + \frac{P_{carga(i)} + jQ_{carga(i)}}{|V_i^0|^2} + \frac{1}{jX_{equivalentegerador} + jX_{transformador(i)}} + \frac{1}{Z_{equivalenteredenó(i)}};$$

$$y_{ik} = \frac{R_{ik}}{R_{ik} + jX_{ik}} = \frac{R_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} - j * \frac{X_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2}.$$

Das expressões apresentadas anteriormente, sabe-se que o R_{ik} é a resistência da linha entre o ponto de análise i e o ponto k. Da mesma forma X_{ik} representa a reactância da linha análoga. Apenas de ressaltar que y_{shi} é a admitância shunt no ponto i da rede, representando metade da soma das admitâncias à terra de todas as linhas que chegam ao ponto 'i' em análise [23]. Aparece também para as admitâncias da diagonal da matriz,

portanto para Y_{ii} , as parcelas somadas referentes às cargas, aos grupos geradores e ao equivalente da rede.

Efectuando assim a inversa da matriz das admitâncias, obtêm-se a matriz $[Z]$. O porquê de fazer este cálculo assim prende-se com a maior facilidade em inverter a matriz das admitâncias (equação 3.2), devido a esta ser tipicamente esparsa [21].

Para efeitos demonstrativos, supõem-se então a matriz 3.3, em que se modeliza um defeito a ocorrer num ponto da rede genérico que se designará por ‘k’.

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{k1} & \dots & Z_{kk} & \dots & Z_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nk} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Tendo a matriz das impedâncias definida e sendo que esta será referente à rede em análise, a definição de I_{cc} está dependente então da aplicação, agora, do teorema da sobreposição, de forma a obter as tensões nodais de curto-circuito, pela equação:

$$[V_{cc}] = [V_0] + [V_T] \quad (3.4)$$

Sendo que $[V_0]$ se refere às tensões de pré-defeito e $[V_T]$ às variações de tensão que aparecem da ligação do gerador equivalente de Thévenin no nó ‘k’, ou nó de defeito.

As variações de tensão têm assim a sua forma de cálculo apresentada na equação 3.5.

$$[V_T] = [Z] \cdot [I_{cc}] \quad (3.5)$$

Por junção das equações 3.4 e 3.5 resulta:

$$[V_{cc}] = [V_0] + [Z] \cdot [I_{cc}] \quad (3.6)$$

Considera-se também que as correntes injectadas, representadas por $[I_{cc}]$, têm apenas um elemento não nulo e que se refere ao valor da corrente no ponto de defeito, estando isso ilustrado na equação 3.7.

$$[I_{cc}] = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_k^{cc} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Conhecendo a equação 3.7 e 3.6, sabendo que o ponto de defeito é referente ao ponto ‘k’, sabe-se então que o elemento do vector de V_{cc} referente a esse ponto pode ser:

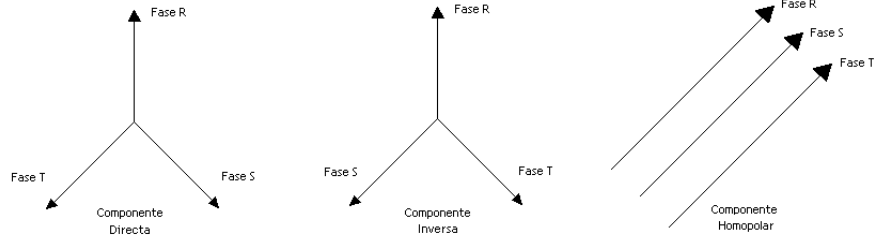


Figura 3.1: Componentes directa, indirecta e homopolar

$$V_k^{cc} = V_k^0 - Z_{kk} \cdot I_k^{cc} \quad (3.8)$$

Sendo o valor de Z_{kk} a impedância correspondente, ao nó 'k' e que coincide com a impedância equivalente de Thévenin da rede vista desse barramento.

Assim e utilizando a equação 3.8, completa-se o ciclo de cálculo, através da equação que se obtém a partir das condições de pós-defeito no próprio nó de defeito, nó 'k', resulta a equação:

$$V_k^{cc} = Z_{def} \cdot I_k^{cc} \quad (3.9)$$

Como já referido Z_{def} representa a impedância de defeito que foi colocada no nó defeito, 'k'. Finalmente, resulta a equação de I_{cc} , por utilização da equação 3.8 e da equação 3.9.

$$I_k^{cc} = \frac{V_k^0}{Z_{kk} + Z_{def}} \quad (3.10)$$

No caso de ser um defeito franco $\rightarrow Z_{def} = 0$.

3.1.2 Assimétricos

No cálculo dos curto-circuitos assimétricos, destaca-se o facto de as cargas serem desequilibradas. Portanto essa assimetria existe, também nos sistemas de correntes e tensões. O problema que se levanta por este pressuposto é a incapacidade de fazer uma análise por fase.

Pelo que aparece o modelo de Fortescue que é capaz de separar qualquer sistema trifásico em três sistemas trifásicos independentes e equilibrados entre si. Este modelo vem permitir uma análise de três sistemas monofásicos, divididos numa componente directa, inversa e homopolar, tal como se pode visualizar na figura 3.1 [24].

As componentes directa, inversa e homopolar, têm significados e interpretações diferentes.

Sabe-se que a componente directa, também conhecida por I_d ou por I_+ (no caso deste

projecto utilizar-se-á a nomenclatura I_d), é basicamente a circulação de correntes no sentido directo. Três vectores iguais e com desfasamento de 120° , são a representação desta componente directa.

No caso da componente inversa, I_i , está-se a falar de uma representação vectorial igual à anterior, mas em que duas das fases têm um sentido de rotação contrário. De ressaltar que as impedâncias directa e inversa geralmente são iguais.

Para a componente homopolar, a nomenclatura usada será I_0 . Esta componente é referente à circulação de corrente para o neutro. O valor da impedância homopolar depende da ligação que existe nos transformadores, com isto, quer-se dizer que caso a ligação seja estrela-triângulo, ou estrela-estrela, etc, pode ou não existir a circulação da corrente homopolar. O valor da impedância homopolar terá que ser fornecido.

Pelo que é possível neste caso estabelecer as relações que nos permitem caracterizar cada fase do sistema. Então sabe-se que:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \\ \underline{I}_0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

E que o mesmo se passa com a tensão:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_R \\ \underline{V}_S \\ \underline{V}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \underline{V}_d \\ \underline{V}_i \\ \underline{V}_0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

O valor de α , nos sistemas anteriores é: $\alpha = e^{j120^\circ}$. De ambas as equações anteriores, é de referir que a matriz que relaciona as fases com as suas componente directa, inversa e homopolar, é a denominada matriz de Fortescue.

Estas equações permitem obter relações de forma bilateral, ou seja, se contrariamente ao apresentado anteriormente se queira obter as componentes I_d , I_i e I_0 , basta utilizar os sistemas anteriores, mas fazendo a inversa da matriz de Fortescue.

Portanto a ideia é aplicar a cada um dos circuitos, tanto ao directo, inverso e homopolar, o teorema de Thévenin. Para cada uma das componentes do circuito, o equivalente de Thévenin, visto de um nó do sistema, é composto pela tensão em circuito aberto em série com a impedância equivalente.

Os geradores são elementos girantes, considerando uma força electromotriz directa e simétrica, com uma matriz de impedâncias com acoplamento cíclico entre fases, em que são utilizados os elementos das diagonais principais das matrizes de impedâncias nodais. Sendo a rede, equivalente a um gerador, pode-se dizer então que estas componentes são como apresentadas em seguida.

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_d \\ \underline{V}_d \\ \underline{V}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{V}_d^0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{Z}_d & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_i & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \\ \underline{I}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{V}_d^0 - \underline{Z}_d \cdot \underline{I}_d \\ -\underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i \\ -\underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Conhecendo então as condicionantes anteriores, o cálculo dos diversos tipos de curto-circuitos assimétricos será explicitado nos pontos seguintes desta secção.

3.1.2.1 Curto-Circuito Fase-Fase

No caso do curto-circuito fase-fase sabe-se que não existe neutro, falta de contacto à terra, pelo que se pode concluir que a componente homopolar é zero. Sendo este um dos pressupostos para a determinação da expressão que permite calcular este tipo de curto-circuito.

Supondo o sistema apresentado na figura 3.2, percebe-se que I_{cc} aparece apenas nas fases de defeito, existindo apenas circulação de corrente nessas fases.

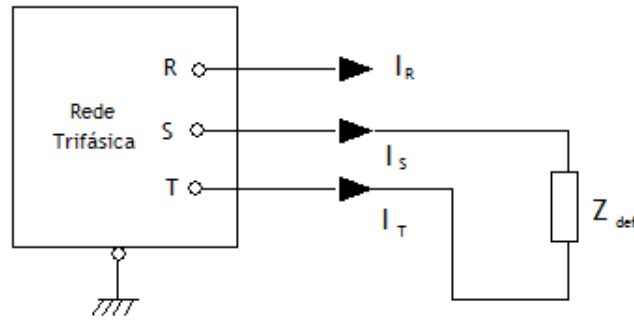


Figura 3.2: Curto-Circuito Fase-Fase

Antes da formulação final ao problema, é necessário antes perceber alguns cálculos iniciais e auxiliares que permitem simplificar e resolver o ‘problema’. Para começar, a matriz de Fortescue será representada por $[T]$, de forma também a que a formulação matemática se torne mais perceptível.

Inicialmente entenda-se que, tal como na figura 3.2, se supõem que a fase ‘R’ terá valor de tensão e corrente iguais a ‘0’.

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_R \\ \underline{V}_S \\ \underline{V}_T \end{bmatrix} = [T] * \begin{bmatrix} \underline{V}_d \\ \underline{V}_i \\ \underline{V}_0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \quad (3.14)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \underline{V}_S = \alpha^2 \cdot \underline{V}_d + \alpha \cdot \underline{V}_i + \underline{V}_0 \\ \underline{V}_T = \alpha \cdot \underline{V}_d + \alpha^2 \cdot \underline{V}_i + \underline{V}_0 \end{cases} \quad (3.15)$$

Sendo nas equações anteriores, $V_R = 0$, $V_0 = 0$.

Esta formulação anterior aplica-se na mesma medida às equações das correntes:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix} = [T] * \begin{bmatrix} \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \\ \underline{I}_0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \quad (3.16)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} 0 = \underline{I}_d + \underline{I}_i + \underline{I}_0 \\ \underline{I}_S = \alpha^2 \cdot \underline{I}_d + \alpha \cdot \underline{I}_i + \underline{I}_0 \\ \underline{I}_T = \alpha \cdot \underline{I}_d + \alpha^2 \cdot \underline{I}_i + \underline{I}_0 \end{cases} \quad (3.17)$$

Sendo nas equações anteriores, $I_R = 0$, $I_0 = 0$.

Da equação 3.17 pode-se retirar por simplificação, duas expressões importantes:

$$\begin{cases} \underline{I}_d = -\underline{I}_i \\ \underline{I}_S = \underline{I}_d \cdot (\alpha^2 - \alpha) \end{cases} \quad (3.18)$$

Por análise da figura 3.2, percebe-se que:

$$\underline{I}_S = \frac{V_S - V_T}{\underline{Z}_{def}} \quad (3.19)$$

Utilizando as equações 3.19, 3.15, 3.13 e 3.18 pode-se chegar ao seguinte resultado por simplificação:

$$\underline{Z}_{def} * (\alpha^2 - \alpha) * \underline{I}_d = (\alpha^2 - \alpha) * (\underline{V}_d^0 - \underline{Z}_d \cdot \underline{I}_d - \underline{Z}_i \cdot \underline{I}_d) \quad (3.20)$$

Obtendo-se assim a equação para a componente directa de curto-circuito:

$$\underline{I}_d^{cc} = \frac{\underline{V}_d^0}{\underline{Z}_{def} + \underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \quad (3.21)$$

Conclui-se então que as correntes de curto-circuito por fase são as apresentadas a seguir [20].

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_R^{cc} \\ \underline{I}_S^{cc} \\ \underline{I}_T^{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ (\alpha^2 - \alpha) \cdot \underline{I}_d^{cc} \\ -(\alpha^2 - \alpha) \cdot \underline{I}_d^{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-j\sqrt{3} \cdot \underline{V}_d^0}{\underline{Z}_{def} + \underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \\ \frac{+j\sqrt{3} \cdot \underline{V}_d^0}{\underline{Z}_{def} + \underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \end{bmatrix} (A) \quad (3.22)$$

3.1.2.2 Curto-Circuito Fase-Terra

Neste caso sabe-se que se está a falar de um curto-circuito monofásico, onde se irá apenas ter valores diferentes de zero na fase R , tal como está ilustrado na figura 3.3

Sabendo que a equação 3.11 também se aplica a este caso, é então fácil concluir que:

$$\underline{I}_R = \underline{I}_d + \underline{I}_i + \underline{I}_0 \iff \iff \frac{\underline{I}_R}{3} = \underline{I}_d = \underline{I}_i = \underline{I}_0 \quad (3.23)$$

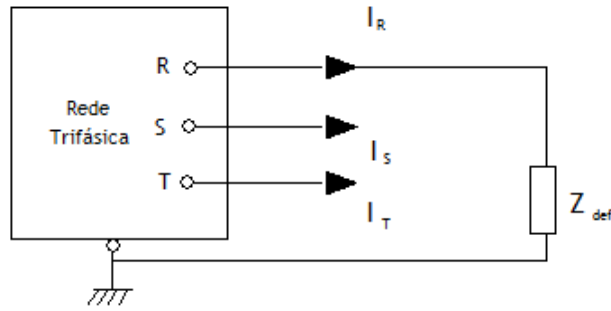


Figura 3.3: Curto-Circuito Fase-Terra

O mesmo se aplica à tensão:

$$\underline{V}_R = \underline{V}_d + \underline{V}_i + \underline{V}_0 \iff \iff \frac{\underline{V}_R}{3} = \underline{V}_d = \underline{V}_i = \underline{V}_0 \quad (3.24)$$

De novo utilizando a figura 3.3 referente a este caso de curto-circuitos, é fácil visualizar a fórmula resultante apresentada de seguida.

$$\underline{V}_R = \underline{Z}_{def} \cdot \underline{I}_R^{cc} \quad (3.25)$$

É agora possível utilizando a equação anterior 3.25, a equação 3.24 3.23 e também a equação 3.13, chegar à seguinte fórmula:

$$\underline{I}_R^{cc} \cdot \underline{Z}_{def} = \underline{V}_d^0 - \frac{\underline{I}_R^{cc}}{3} * (\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0) \quad (3.26)$$

Pelo que, com as devidas alterações rapidamente se chega à equação para a corrente de curto-circuito na fase de defeito.

$$\underline{I}_R^{cc} = \frac{3 \cdot \underline{V}_d^0}{3 \cdot \underline{Z}_{def} + \underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0} (A) \quad (3.27)$$

Feita uma análise à equação anterior, percebe-se o porquê de este curto-circuito corresponder ao de menor magnitude, visto que o valor mais alto das impedâncias torna o valor da corrente inferior.

3.1.2.3 Curto-Circuito Fase-Fase-Terra

Falta apenas agora fazer uma análise ao curto-circuito assimétrico que é capaz de atingir uma magnitude de defeito superior à dos restantes. Para isso e tal como anteriormente, este tipo de defeito é aqui ilustrado através da figura 3.4. Esta figura, assim como nos pontos anteriores, pretende ajudar a perceber melhor a análise efectuada.

Supondo então, e como ilustrado, que $I_R = 0$, e trabalhando o sistema da equação 3.11, é possível determinar as correntes simétricas de defeito.

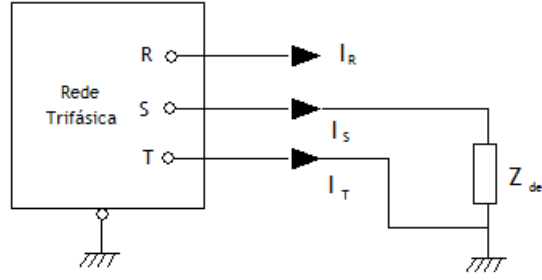


Figura 3.4: Curto-Circuito Fase-Fase-Terra

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_d^{cc} \\ \underline{I}_i^{cc} \\ \underline{I}_0^{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(\underline{Z}_i + \underline{Z}_0 + 3 \cdot \underline{Z}_{def}) \cdot \underline{V}_d^0}{\underline{Z}_d \cdot \underline{Z}_i + \underline{Z}_d \cdot (\underline{Z}_0 + 3 \cdot \underline{Z}_{def}) + \underline{Z}_i \cdot (\underline{Z}_0 + 3 \cdot \underline{Z}_{def})} \\ \frac{(\underline{Z}_0 + 3 \cdot \underline{Z}_{def}) \cdot \underline{V}_d^0}{\underline{Z}_d \cdot \underline{Z}_i + \underline{Z}_d \cdot (\underline{Z}_0 + 3 \cdot \underline{Z}_{def}) + \underline{Z}_i \cdot (\underline{Z}_0 + 3 \cdot \underline{Z}_{def})} \\ \frac{\underline{Z}_i \cdot \underline{V}_d^0}{\underline{Z}_d \cdot \underline{Z}_i + \underline{Z}_d \cdot (\underline{Z}_0 + 3 \cdot \underline{Z}_{def}) + \underline{Z}_i \cdot (\underline{Z}_0 + 3 \cdot \underline{Z}_{def})} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Isto resulta nas seguintes correntes de curto-circuito por fase [20].

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_R^{cc} \\ \underline{I}_S^{cc} \\ \underline{I}_T^{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_d^{cc} \\ \underline{I}_i^{cc} \\ \underline{I}_0^{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-j\sqrt{3} \cdot (\underline{Z}_0 + 3 \cdot \underline{Z}_{def} - \alpha \underline{Z}_i) \cdot \underline{V}_d^0}{\underline{Z}_d \cdot \underline{Z}_i + \underline{Z}_d \cdot (\underline{Z}_0 + 3 \cdot \underline{Z}_{def}) + \underline{Z}_i \cdot (\underline{Z}_0 + 3 \cdot \underline{Z}_{def})} \\ \frac{j\sqrt{3} \cdot (\underline{Z}_0 + 3 \cdot \underline{Z}_{def} - \alpha^2 \underline{Z}_i) \cdot \underline{V}_d^0}{\underline{Z}_d \cdot \underline{Z}_i + \underline{Z}_d \cdot (\underline{Z}_0 + 3 \cdot \underline{Z}_{def}) + \underline{Z}_i \cdot (\underline{Z}_0 + 3 \cdot \underline{Z}_{def})} \end{bmatrix} \quad (A) \quad (3.29)$$

Determinado este curto-circuito, fica apenas agora a necessidade de perceber como utilizar as várias correntes na determinação da corrente máxima possível que afecta os barramentos.

3.1.3 Compilação de fórmulas para a determinação da I_{cc}

A tensão inicial \underline{V}^0 e a tensão de serviço da rede \underline{U}_N estão relacionadas entre si pelo factor ‘c’. Assim, a relação é a seguinte:

$$\underline{V}^0 = \frac{c \cdot \underline{U}_N}{\sqrt{3}} \quad (3.30)$$

Conhecendo a equação anterior e as equações para os correntes de curto-circuito (considerando, $\underline{Z}_{def} = 0$) já aqui apresentadas, pode-se obter um formulário conciso sobre as

fórmulas a utilizar na determinação destas correntes. O formulário é o que se apresenta em seguida. De notar que no caso de se querer o valor das correntes de curto-circuito máximas o valor da constante $c = 1.0$, quer a ocorrência do curto-circuito seja próxima ou afastada dos geradores.

- curto-circuito trifásico simétrico:

$$\underline{I}_{trifásico}^{cc} = \frac{c \cdot \underline{U}_N}{\sqrt{3} \cdot |\underline{Z}_d|} \quad (3.31)$$

- curto-circuito fase-fase:

$$\underline{I}_{fase-fase}^{cc} = \frac{c \cdot \underline{U}_N}{|\underline{Z}_d + \underline{Z}_i|} \quad (3.32)$$

- curto-circuito fase-terra:

$$\underline{I}_{fase-terra}^{cc} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot \underline{U}_N}{|\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0|} \quad (3.33)$$

- curto-circuito fase-fase-terra:

$$\underline{I}_{fase-fase-terra}^{cc} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot \underline{U}_N}{|\underline{Z}_d + \underline{Z}_0 + \underline{Z}_0 \cdot \frac{\underline{Z}_d}{\underline{Z}_i}|} \quad (3.34)$$

3.1.4 Corrente de Curto-Circuito para a determinação dos Esforços

O cálculo do CC é necessário para o dimensionamento dos equipamentos da rede. No entanto, os curto-circuitos têm um período transitório, outro sub-transitório, até chegar à sua fase permanente. Assim é possível fazer uma análise temporal à evolução do CC. E é a partir dessa análise mais minuciosa que se determinará, por fase, o instante de ocorrência do valor de maior esforço electrodinâmico.

Os esforços electrodinâmicos serão calculados tendo em conta a corrente de pico do defeito. Mas, uma forma de individualizar por fase os valores das correntes será apresentada em seguida. Pode-se modelizar este defeito, considerando que a rede eléctrica é constituída por uma fonte de energia em corrente alternada, AC, de valor constante.

Pode-se utilizar o circuito da figura 3.5, onde a impedância a jusante, Z_c , está precedida por um interruptor e uma carga de impedância Z_m .

Assim, Z_m é o equivalente da rede global que se encontra a montante do curto-circuito, considerando neste caso as várias redes com diferentes tensões (AT, MT, BT). Quando o defeito ocorre entre A e B, a impedância entre esses pontos é nula, corresponde ao já falado, defeito franco. Ocorre então um aumento da corrente, aparecendo então a corrente

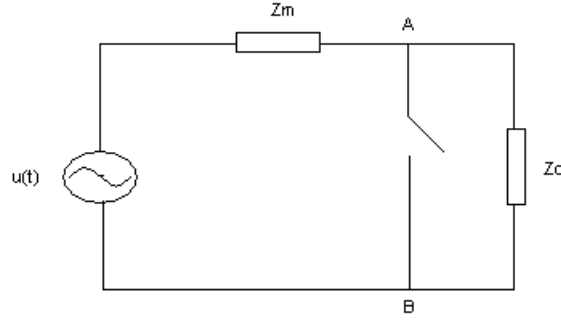


Figura 3.5: Esquema de uma Rede [4]

de curto-circuito, I_{cc} , apenas limitada pela impedância $Z_m = \sqrt{R^2 + X^2}$. A fórmula para a corrente está representada na equação 3.35.

$$i(t) = i_{ac} + i_{dc} \quad (3.35)$$

O fecho do interruptor da figura 3.5 corresponde à ocorrência do defeito, e a corrente por fase de curto-circuito pode ser calculada pela seguinte equação:

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot [\text{sen}(wt + \alpha - \phi) - \text{sen}(\alpha - \phi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}] \quad (3.36)$$

Em que $I = I_{cc}$ eficaz, e pode-se também ver na expressão em cima as componentes AC e DC, sendo o primeiro termo forçado sinusoidal, à frequência da rede, e o segundo termo uma componente contínua que se anula rapidamente, de acordo com $\frac{R}{L}$. O ângulo α é o que se chama de ângulo característico, correspondente ao esfazamento entre a tensão e o instante de CC. O ϕ é o ângulo do factor de potência.

Distinguem-se então duas situações, que são dos curto-circuitos perto ou longe dos alternadores/geradores, figura 3.6.

Na figura 3.6, o 'A' corresponde ao valor inicial da componente contínua.

Este cálculo da corrente de defeito será feito por fase, sendo as fases desfasadas de 120° entre elas.

Na interacção electrodinâmica entre as diversas fases, ou seja, nas forças que cada fase pode provocar nas outras, serão tomados em consideração os valores de corrente de curto-circuito por fase. A determinação das correntes para calcular os esforços electrodinâmicos, pode ser feita desta forma e apontando o ponto no tempo de ocorrência máximo.

No entanto, o valor de corrente máxima, ou seja a corrente de pico, pode ser determinada por simplificação da equação 3.36. Resultando na seguinte fórmula de cálculo [20]:

$$I_p(t) = \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot \left(1,02 + 0,98 \cdot e^{-3\frac{R}{X}t}\right) \quad (3.37)$$

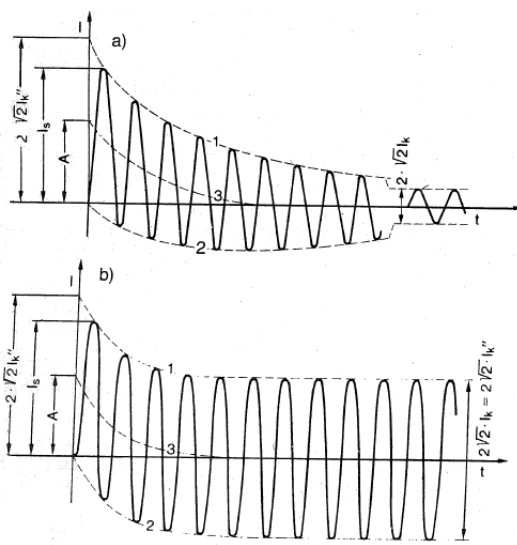


Figura 3.6: Variação no tempo da corrente de curto-circuito - a) num ponto próximo do alternador b) num ponto afastado do alternador [2]

Onde o valor inicial da componente contínua do CC depende do instante em que ocorre o CC (determinado de forma empírica) [20].

Esta formulação resulta na versão mais conhecida da expressão correspondente à equação 3.38. Visto que estamos a referir-nos a curto-circuitos trifásicos, estes são tratados como se o curto-circuito ocorresse simultâneamente em todas as fases.

$$I_p = K \cdot \sqrt{2} \cdot I_{cc} \quad (3.38)$$

Então a constante 'k' pode ter uma boa aproximação pela expressão: $k = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}}$. O valor de 'k' pode então ser determinado pelo gráfico representado na figura 3.7. A utilização desta fórmula, implica o conhecimento de alguns parâmetros da rede, facto que não se verifica muitas vezes no instalador ou quadrista.

A utilização deste factor 'k' depende que, nas redes com ramificações, a relação $\frac{R}{X}$ é igual em todos os ramos. No caso teórico de $R = 0$, ou seja, no caso da resistência do percurso de curto-circuito ser nula, o factor da equação anterior, 'k', pode atingir o valor 2. Como na presente dissertação o tema é referente a quadros eléctricos de *baixa tensão*, sabe-se que 'k' nunca excede o valor de 1,8 [2]. Portanto, para o cálculo desta corrente de pico e por uma questão de segurança, considerar-se-á sempre (e para o cálculo do distanciamento entre suportes), $k = 1,8$ [22].

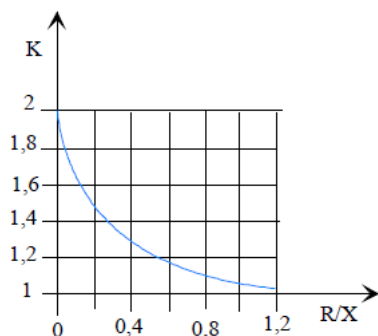


Figura 3.7: Variação de K em função de R/X (CEI60909) [5] [4]

3.2 Esforços Electrodinâmicos

Como já foi referido, os esforços electrodinâmicos são uma das manifestações dos curto-circuitos nos barramentos dos quadros eléctricos. Além da temperatura, estes esforços podem causar danos irreparáveis nos equipamentos. A selecção adequada dos equipamentos a utilizar torna-se assim fundamental.

Esta escolha interfere com parâmetros como a protecção dos equipamentos, visto que uma adequada escolha de secção (consoante a corrente de serviço) e suporte são fundamentais para evitar defeitos de operação.

Assim e antes de efectivar quais as formas de cálculo para estes equipamentos, é possível verificar que o dimensionamento destes esforços aparece directamente do electromagnetismo. A idealização que existe uma força dependente de correntes, é uma das leis básicas da magnetoestática. A utilização da *lei de Biot-Savart* ou da *lei de Ampère* podem levar a resultados que nos indicassem quais as forças existentes e as suas magnitudes [25].

Na prática, estamos a falar da força que aparece entre dois fios condutores rectos e paralelos, de comprimento l , percorridos por duas correntes eléctricas, I_1 e I_2 , separados por uma distância d . O valor μ corresponde à permissividade do meio. Os fios interagem entre eles com uma força magnética:

$$F_m = B_1 \cdot I_2 \cdot l \quad \wedge \quad B_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot d} \Leftrightarrow$$

$$F_m = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l \quad (3.39)$$

As forças entre os fios constituem um par de acção-reacção, logo podem ser de atracção ou de repulsão, como se pode constatar na figura 3.8.

Servindo como introdução aos esforços electrodinâmicos, pode-se agora fazer uma aproximação ao problema à luz deste projecto.

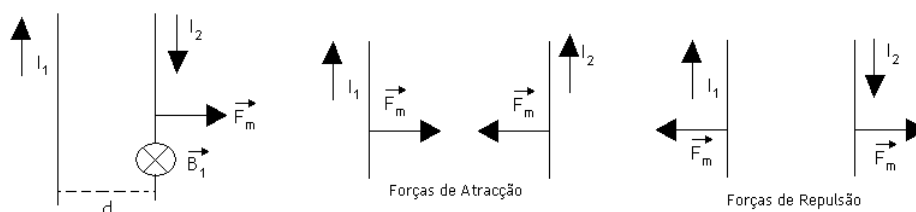


Figura 3.8: Força Magnética

3.2.1 Aspectos Gerais de Dimensionamento

Existe então um propósito na determinação dos esforços electrodinâmicos, determinando na prática quais as distâncias entre os apoios que sustentam os barramentos. Essa exploração será feita numa fase posterior desta dissertação, numa vertente mais prática. No entanto, a formulação do cálculo dos esforços será feita aqui. Assim como a demonstração de quais os valores das forças existentes nos apoios.

Através do valor eficaz de I_{cc} , é possível obter as correntes por fase (equação 3.36) que resultam nos valores de forças electrodinâmicas entre fases:

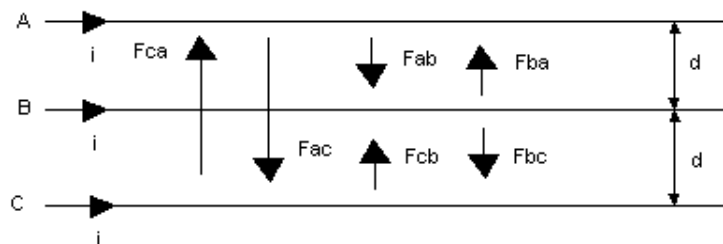


Figura 3.9: Forças por Fase

Os esforços electrodinâmicos entre as fases são os seguintes:

$$\begin{aligned} F_{ab}(t) &= \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot I_a(t) \cdot I_b(t) \\ F_{bc}(t) &= \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot I_b(t) \cdot I_c(t) \\ F_{ac}(t) &= \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot I_a(t) \cdot I_c(t) \end{aligned} \quad (3.40)$$

O valor de μ_0 corresponde à permeabilidade do vazio e as equações seguintes representam os valores de forças electrodinâmicas em cada fase.

$$\begin{aligned} F_a(t) &= F_{ab}(t) + F_{ac}(t) \\ F_b(t) &= F_{ab}(t) - F_{bc}(t) \\ F_c(t) &= F_{cb}(t) + F_{ca}(t) \end{aligned} \quad (3.41)$$

Pode-se dizer que o maior valor de força electrodinâmica aparece sempre na fase “b”.

Sendo que d representa a distância entre as barras ou entre fases. No caso das fases serem compostas por mais do que uma barra, a distância d é compreendida entre os centros dos conjuntos de barras.

Segundo a bibliografia pesquisada, a fórmula que permite obter a força electrodinâmica máxima é apresentada na equação 3.42, quando as barras são percorridas pela mesma corrente [2]. Sendo que a alteração visível da equação 3.39, é considerar $I_1 = I_2$, alteração essa que se deve à consideração de as correntes que percorrem as diferentes fases serem simétricas (corrente de curto-circuito máxima = corrente de curto-circuito simétrica).

A componente I_p é correspondente à corrente de pico do curto-circuito. Esta formulação é uma simplificação de cálculo ao método anterior, mas é também a que leva a um dimensionamento no limite máximo de ocorrência de um defeito.

$$F_e = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot I_p^2 \cdot l \quad (3.42)$$

Esta força pode tomar a forma numérica simplificada, representada na equação 3.43 [2].

$$F_e = 0,2 \cdot I_p^2 \cdot \frac{l}{d} \quad (3.43)$$

Nos barramentos, as manifestações dos esforços electrodinâmicos materializam-se em forças exteriores neles aplicadas. Quando se submete um corpo a uma força exterior, o esforço é definido como a soma das forças interiores capazes de resistir a esta solicitação.

“Se puede definir el esfuerzo como el valor total de las fuerzas interiores que resisten el cambio de forma de un cuerpo cuando está sometido a fuerzas exteriores.” [26]

Um esforço é uma variação a nível molecular das distâncias entre os pontos desse corpo. Portanto, quando se produz um esforço e este provoca deformação, produz-se trabalho [27].

Existem, nesta perspectiva, vários tipos de esforços.

- Esforços de Tracção;
- Esforços de Compressão;
- Esforços de Ruptura;
- Esforços de Flexão.

Para a análise dos barramentos em quadros eléctricos, todo o tipo de esforços tem influência nos barramentos, mas especialmente para o cálculo do distanciamento entre apoios, está-se a referir ao *esforço de flexão*.

Quando se diz que esta força electrodinâmica provoca somente uma deformação elástica no material, quer dizer que se trata de um esforço de flexão. Quando produz uma deformação plástica, temos um esforço permanente, deformação inelástica.

Isso quer dizer que, no fundo, está-se a referir a duas etapas diferentes de aplicação de um mesmo esforço.

Em algumas aplicações industriais, envolvendo materiais de alta resistência, é muito importante conhecer o comportamento do material quando submetido a esforços de flexão. [28]

Neste tipo de esforço intervêm forças exteriores unidireccionais sobre uma barra apoiada em um ou mais pontos, criando um momento medido em $N \cdot m$, e que se denomina de momento de flexão.

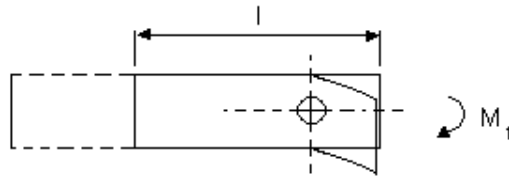


Figura 3.10: Momento de Flexão

Este momento pode ser visualizado por inspecção da figura 3.10. Sendo que a equação que torna possível a obtenção do momento é a explicitada na equação:

$$M_f = F \cdot l (N \cdot m) \quad (3.44)$$

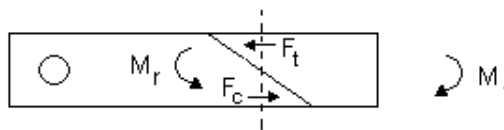


Figura 3.11: Momento de Compensação

Sendo F a resultante das forças tangenciais exteriores em Newton e l a distância ao ponto de apoio em metro.

A existência de um momento de flexão, M_f , implica que terá que existir necessariamente um momento que compense este, ou seja um momento compensador, como se pode ver na figura 3.11. Por análise dessa figura percebe-se que este momento compensador existe por aparecimento do par de forças F_t e F_c , que por sua vez deverão ser de igual valor. Sendo este momento compensador o que cria um equilíbrio mecânico na peça em estudo.

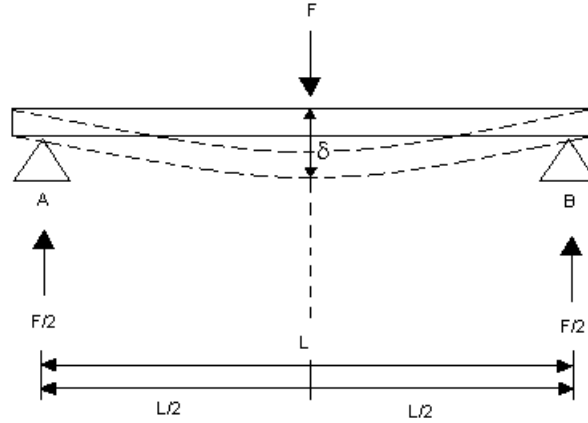


Figura 3.12: Esforço de Flexão: Força Aplicada no centro do Barramento

No dimensionamento das forças nos apoios dos barramentos, pode-se supor uma barra apoiada nos seus extremos, mas com dois casos distintos:

1. força tangencial exterior aplicada no centro da barra;
2. força tangencial exterior aplicada de forma uniforme na barra.

Estas forças tangenciais, serão as forças electrodinâmicas.

No caso da aplicação da força apenas no centro da barra, pode-se analisar a figura 3.12. Vai-se considerar desprezável o peso da barra.

A força aplicada no barramento fará com que sinta flexão, ou seja, com que exista uma deformação elástica. Esta deformação será máxima na zona central do barramento, e denomina-se de flecha, δ .

Nos apoios e devido à aplicação de F , aparecem forças de reacção [26].

$$F_A = F_B = \frac{F}{2} \quad (3.45)$$

Sendo que o momento de flexão máximo é:

$$\begin{aligned} M_{\text{máx}} &= \frac{F}{2} \cdot \frac{l}{2} \\ &= F \cdot \frac{l}{4} \end{aligned} \quad (3.46)$$

No caso de a força F ser aplicada de forma uniforme ao longo do barramento, aparece uma flecha tal como no caso anterior, mas a deformação elástica é inferior à do caso anterior. Pode-se verificar visualmente este caso na figura 3.13.

Nos apoios e devido à aplicação de F , aparecem forças de reacção [26].

$$F_A = F_B = \frac{F}{4} \quad (3.47)$$

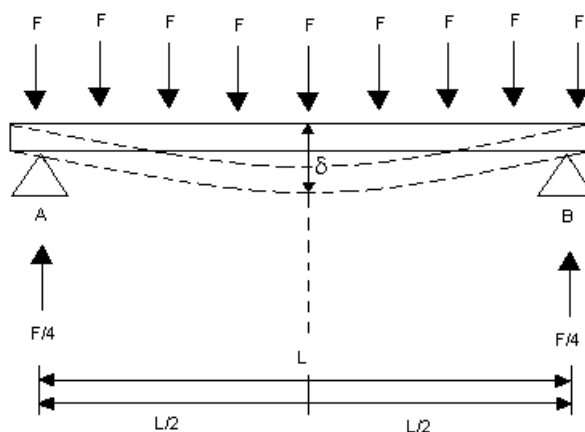


Figura 3.13: Esforço de Flexão: Força Aplicada uniformemente pelo Barramento

Sendo que o momento de flexão máximo é:

$$\begin{aligned} M_{máx} &= \frac{F}{4} \cdot \frac{l}{2} \\ &= F \cdot \frac{l}{8} \end{aligned} \quad (3.48)$$

No início, é necessário no entanto saber qual a barra (barramento) que se utilizará. Para isso é necessário saber qual a corrente prevista no quadro e a prevista evolução para a instalação, ‘ K_e ’, é possível calcular a corrente de serviço, $I_{servico}$, a prever para o referido quadro.

$$I_{servico} = K_e \cdot I(A) \quad (3.49)$$

Esta corrente permite obter através de tabelas próprias para o efeito quais os valores das secções dos barramentos a utilizar, por comparação com as correntes máximas admissíveis nestes [29]. Estes valores encontram-se normalizados [11]. A tabela 3.2 explicita tais valores.

Feita esta escolha, será então possível numa fase posterior calcular os esforços nos apoios que sustentam os barramentos, tornando-se possível determinar quais os distanciamentos entre apoios.

Os barramentos têm um momento resistente mínimo necessário para que o trabalho de flexão se efectue com segurança e que é obtido pela equação:

$$W \geq \frac{M}{\sigma} \quad (3.50)$$

Neste caso, o σ depende do material de qual é feito o barramento.

- Cobre $\rightarrow \sigma = 1000$ a $1200(kg/mm^2)$

- Alumínio $\rightarrow \sigma = 400 \text{ a } 600(\text{kg}/\text{mm}^2)$

Para que a barra resista ao curto-circuito, o seu módulo de flexão “ W ” tem que ser superior ao momento resistente devido à força desenvolvida entre barramentos.

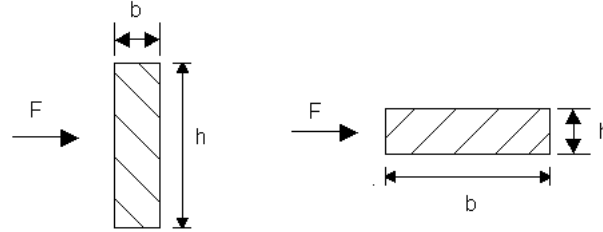


Figura 3.14: Momento Resistente e Momento de Inércia - um barramento por fase

O cálculo do momento resistente e do momento de inércia é apresentado em seguida. Por análise da figura 3.14, podem-se perceber os parâmetros contidos nas fórmulas de cálculo destes momentos, equação 3.51 e 3.52, respectivamente, o momento resistente e momento de inércia.

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} (m^3) \quad (3.51)$$

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12} (m^4) \quad (3.52)$$

Sendo $b \times h$, largura e a altura respectivamente, compondo assim a secção do barramento.

Mas neste caso específico existe a possibilidade de cada fase de barramentos ser constituída por mais do que um barramento. E para todos esses casos específicos existe o cálculo individualizado dos momentos. Sendo que o caso mais simples de se ter um barramento por fase, foi o explicitado nas equações 3.51 e 3.52.

Pretende-se em seguida apresentar todas as formas individuais de cálculo para os casos de cada fase ter dois, três ou quatro barramentos por fase. De notar, apenas, que para estas soluções se considera sempre que os barramentos são montados paralelos uns aos outros e com a faces de maiores dimensões em paralelo. Este tipo de montagem é utilizada para casos de corrente de CC e de serviço elevadas.

Assim, no caso de serem dois barramentos como consta na figura 3.15, podem-se perceber os parâmetros contidos nas fórmulas de cálculo destes momentos, equação 3.53 e 3.54, respectivamente, o momento resistente e momento de inércia.

$$W_y = \frac{b}{6B} \cdot (B^3 - a'^3) (m^3) \quad (3.53)$$

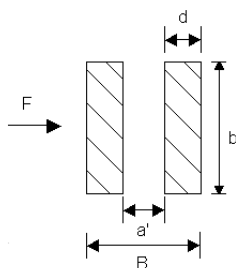


Figura 3.15: Momento Resistente e Momento de Inércia - dois barramentos por fase

$$J_y = \frac{b}{12} \cdot (B^3 - a'^3)(m^4) \quad (3.54)$$

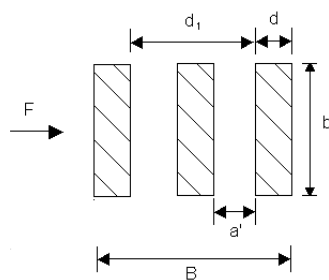


Figura 3.16: Momento Resistente e Momento de Inércia - três barramentos por fase

Para três barramentos, figura 3.16, podem-se perceber os parâmetros contidos nas fórmulas de cálculo destes momentos, equação 3.55 e 3.56.

$$W_y = \frac{b}{6B} \cdot (B^3 - d_1^3 + d^3)(m^3) \quad (3.55)$$

$$J_y = \frac{b}{12} \cdot (B^3 - d_1^3 + d^3)(m^4) \quad (3.56)$$

Para quatro barramentos, figura 3.17, podem-se perceber os parâmetros contidos nas fórmulas de cálculo destes momentos, equação 3.57 e 3.58.

$$W_y = \frac{b}{6B} \cdot (B^3 - d_1^3 + d_2^3 - d_3^3)(m^3) \quad (3.57)$$

$$J_y = \frac{b}{12} \cdot (B^3 - d_1^3 + d_2^3 - d_3^3)(m^4) \quad (3.58)$$

As correntes máximas admissíveis que permitem a escolha das secções dos barramentos encontram-se explicitadas na tabela 3.2. A explanação dos valores dos momentos resistentes e dos momentos de inércia encontram-se na tabela 3.1.

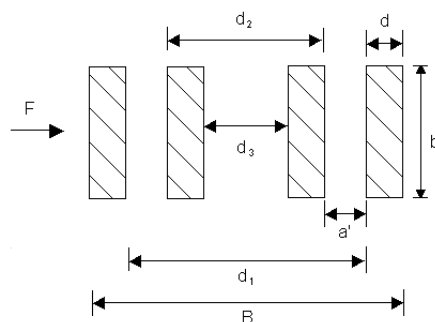


Figura 3.17: Momento Resistente e Momento de Inércia - quatro barramentos por fase

Sabendo então que o cobre (barramentos) tem um $\sigma = 100(N/mm^2)$, e sabendo quais os valores dos momentos resistentes, W , é possível (admitindo que a condição da equação 3.50 tem que ser verdade) obter qual o momento de flexão para cada uma das situações de colocação dos barramentos.

Assim, para o dimensionamento do espaçamento entre apoios de barramentos, nos seus valores limite, pode-se conjugar a equação 3.43, com as equações 3.46 e 3.48. No caso de se estar a utilizar a equação 3.46, corresponde a modelizar a situação extrema em que a força só tem aplicação num ponto da barra, mas que não corresponde à realidade. No caso de se utilizar a equação 3.48, supõem-se a força electrodinâmica uniformemente distribuída ao longo da barra e que corresponde à situação real, mas não extrema. Neste projecto, apesar de se tentar apresentar todas as soluções de forma abrangente, optou-se por fazer este dimensionamento tendo em conta a situação mais próxima da realidade, ou seja, a situação que modeliza o sistema de forças considerando-as aplicadas uniformemente ao longo dos barramentos.

Tabela 3.2: Barramentos em Cobre Electrolítico [11]

Por Barra			Intensidade Máxima Admissível															
Dimensões (mm)	Área (mm²)	Peso (kg/ftm)	Corrente Alternada (40 - 50 - 60 Hz)								Corrente Contínua e AC até 16 Hz							
			Nº de Barras Pintadas				Nº de Barras Nuas				Nº de Barras Pintadas				Nº de Barras Nuas			
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
12 x 2	23,5	0,209	125	225	0	0	110	200	0	0	130	230			115	205		
15 x 2	28,5	0,262	155	270	0	0	140	240	0	0	160	275			145	245		
15 x 3	44,5	0,396	185	330	0	0	170	300	0	0	180	335			175	305		
20 x 2	39,5	0,351	205	350	0	0	185	315	0	0	210	360			190	325		
20 x 3	59,5	0,529	245	425	0	0	220	380	0	0	250	435			225	390		
20 x 5	99,1	0,882	325	560	0	0	295	500	0	0	330	570			300	510		
25 x 3	74,5	0,663	300	520	0	0	270	460	0	0	305	530			275	470		
25 x 5	124	1,11	395	670	0	0	350	600	0	0	400	680			355	610		
30 x 3	89,5	0,796	355	610	0	0	315	540	0	0	360	630			320	560		
30 x 5	149	1,33	450	780	0	0	400	700	0	0	460	800			410	720		
40 x 3	119	1,06	460	790	0	0	420	710	0	0	470	820			430	740		
40 x 5	199	1,77	600	1000	0	0	520	900	0	0	610	1030			530	930		
40 x 10	399	3,55	850	1500	2060	2800	760	1350	1850	2500	870	1550	2180		770	1400	2000	
50 x 5	249	2,22	720	1220	1750	2300	630	1100	1650	2100	740	1270	1870		650	1150	1750	
50 x 10	499	4,44	1030	1800	2450	3330	920	1600	2250	3000	1070	1900	2700		960	1700	2500	
60 x 5	299	2,66	850	1430	1950	2650	760	1250	1760	2400	870	1500	2100	2750	780	1300	1900	2500
60 x 10	599	5,33	1200	2100	2900	3700	1060	1900	2600	3500	1250	2200	3000	3800	1100	2000	2800	3600
80 x 5	399	3,55	1070	1900	2500	3200	970	1700	2300	3000	1100	2000	2700	3400	1000	1800	2500	3200
80 x 10	799	7,11	1560	2500	3300	4500	1380	2300	3100	4200	1650	2800	3900	5000	1450	2600	3700	4800
100 x 5	499	4,44	1350	2300	3000	3800	1200	2050	2850	3500	1400	2500	3400	4300	1250	2250	3150	4050
100 x 10	999	8,89	1880	3100	4000	5400	1700	2800	3650	5000	2000	3600	4900	6200	1800	3200	4500	5800
120 x 10	1200	10,7	2200	3500	4500	6100	2000	3100	4100	5700	2350	4200	5700	7200	2150	3700	5200	6700
125 x 5	625	5,32	0	0	0	0	1250	2140	2800	3200	0	0	0	0	0	0	0	0
150 x 5	799	7,11	1550	2500	3300	4500	1380	2300	3100	4200	1650	2800	3900	5000	1450	2600	3700	4800
160 x 10	1600	14,2	2800	4400	5800	7800	2500	3900	5300	7300	3100	5400	7500	9600	2800	4800	6900	9000
200 x 10	2000	17,8	3350	5300	6900	9400	3000	4750	6350	8800	3600	6700	9200	11700	3400	6000	8500	11000

3.2.2 Métodos dos Elementos Finitos

Este método tem como propósito reduzir a determinação dos esforços a um problema “microscópico”, ou seja, permite dividir a região em estudo em pequenas sub-regiões, chamadas de elementos finitos. É desta divisão que resulta a denominada malha de elementos finitos.

“O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidos os resultados desejados.” [30]

Existe sempre na engenharia a dificuldade de simular eventos físicos através de modelos matemáticos conceptuais. Estes modelos matemáticos são desenvolvidos tendo em conta as leis da física, e podem ser descritos por equações algébricas, diferenciais ou integrais.

Pode-se definir um modelo matemático baseado nas relações entre as variáveis e interações do sistema em análise. Modelos matemáticos de fenómenos físicos são geralmente baseados em leis fundamentais da física, como por exemplo o princípio da conservação da massa, princípio da conservação do momento linear e da conservação da energia.

Os modelos matemáticos de sistemas de engenharia são muitas vezes caracterizados por equações e regiões geométricas complicadas. Portanto, até um passado recente, estes sistemas eram extremamente simplificados de forma a poder obter soluções para eles. Mas, com a evolução da electrónica, em especial da capacidade de computação, estes problemas de resolução de sistemas complexos foi sendo resolvido. Actualmente, a grande indústria por exemplo automóvel, aeroespacial, química, farmacêutica e de petróleo, usam este tipo de tecnologia baseada em mecânica computacional para simularem sistemas de grande complexidade [31].

O método dos elementos finitos é baseado na ideia que é possível dividir todo o tipo de sistemas em várias partes físicas, consequentemente a solução será também representada por várias partes. As partes físicas podem ser a geometria, a cinemática, o material e as condições de fronteira, sendo estas as permissas para cada problema.

Este método pode ser dividido em três grandes premissas [31]:

1. o sistema pode ser constituído por várias formas geométrias simples, chamadas de elementos finitos;
2. por cada elemento finito, as variáveis desconhecidas podem ser aproximadas por combinações lineares de polinómios algébricos, por parâmetros indeterminados e por relações algébricas. Sendo os parâmetros indeterminados uma representação das variáveis desconhecidas em determinados pontos da geometria, chamados de nós do elemento;

3. todas as relações algébricas são feitas de acordo com considerações de continuidade e de “equilíbrio”.

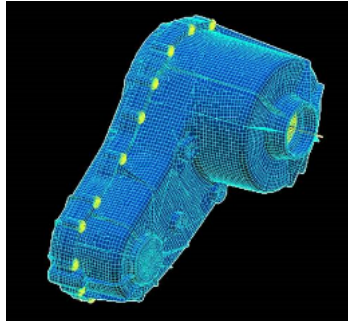


Figura 3.18: Exemplo de uma malha utilizando o método dos elementos finitos. [6]

“Engineering design is the process of altering dimensions, shapes, and materials to find the best (optimum) configuration of the system to carry out certain specific function.” [31]

Os elementos finitos podem ser de diferentes tamanhos e formas, a sua disposição pode ser efectuada da forma desejada e por locais de interesse. O que quer dizer que é possível dispor as formas dos elementos finitos da forma desejada, por exemplo dispondo com mais densidade na região que se pretenda analisar com mais detalhe. Estes elementos formam então uma estrutura de dados, malhas (ilustrado um exemplo na figura 3.18), pontos nodais, sendo possível avaliar aproximadamente as grandezas de interesse nos fenómenos analisados.

Este tipo de avaliação e definição dos elementos finitos poderá ter aplicação neste projecto para analisar os pontos nevrálgicos dos barramentos e dos quadros eléctricos, permitindo uma avaliação minuciosa ao efeito que os esforços electrodinâmicos terão nas estruturas dos quadros eléctricos.

Aplicando este método a um problema específico, podemos analisar duas situações diferentes. Caso se esteja a fazer uma análise preliminar, o sistema em análise pode ser mais simples. No caso de estar a fazer a verificação a um sistema já desenhado e finalizado, a análise deve ser o mais exaustiva possível, incluindo na análise o maior número de parâmetros possível.

Portanto, as premissas do problema, assim como os parâmetros a incluir na análise, deverão ser cuidadosamente escolhidos consoante o objectivo final.

“Thus, the objectives will dictate the type of idealization of the system to be adopted; for example, should we model as a two-dimensional or three-dimensional problem?, analyze as a linear or nonlinear problem and what type

of nonlinearities to be considered?, what type constitutive model to be used?, how are the loads and boundary conditions of the actual system are idealized?, what coupling effects, if any, to be considered?” [31]

Portanto, em suma, e após a definição do modelo matemático a aproximação no modo computacional ao problema, pode ser definido pelos seguintes tópicos [31]:

1. Escolha das variáveis desconhecidas, que acabam por definir qual o modelo de elemento finito a ser aplicado;
2. Tipo de Elementos;
3. Tipo de malha;
4. Definição da solução do método iterativo;
5. Critério de erro;
6. Tolerância de erro;
7. Definição do número de iterações a serem realizadas pelo processo até atingir a solução óptima.

No final, torna-se apenas necessário “*validar*” o modelo matemático definido e também “*verificar*” o algoritmo computacional.

A “*verificação*” - partindo do princípio que os resultados dados pela análise computacional são iguais aos do modelo matemático - pode ser efectuada por comparação das soluções numéricas, com soluções obtidas experimentalmente na prática.

A “*validação*” corresponde a determinar até que ponto o modelo matemático e portanto a resposta computacional já verificada corresponde às especificações físicas requeridas e definidas para o sistema. Caso estas condições não se verifiquem, isso implicará uma nova definição ao modelo matemático.

As soluções para este método representam quais os pontos principais de stress nos materiais. Sendo que a forma de entender qual a dimensão do stress no material, é por análise dos graus de liberdade, um dos parâmetros analisados no MEF. Essa intensidade de graus de liberdade é representada habitualmente a cores, com intensidade que cresce quando o grau aumenta. Podem-se ver exemplos disso na figura 3.19.

Neste projecto, poderia ser aplicado este sistema à produção dos quadros eléctricos, assim como à produção dos suportes, por análise dos esforços mecânicos existentes, devido às correntes de curto-circuito. A ideia seria otimizar estas soluções tanto no tipo de material empregue até à sua forma construtiva. No entanto, percebe-se que muitos dos parâmetros necessários à implementação do método são características produtivas. Portanto, seria necessário um contacto estreito com a secção produtiva e seria necessário obter software's próprios para a resolução dos sistemas matemáticos definidos. Pelo que

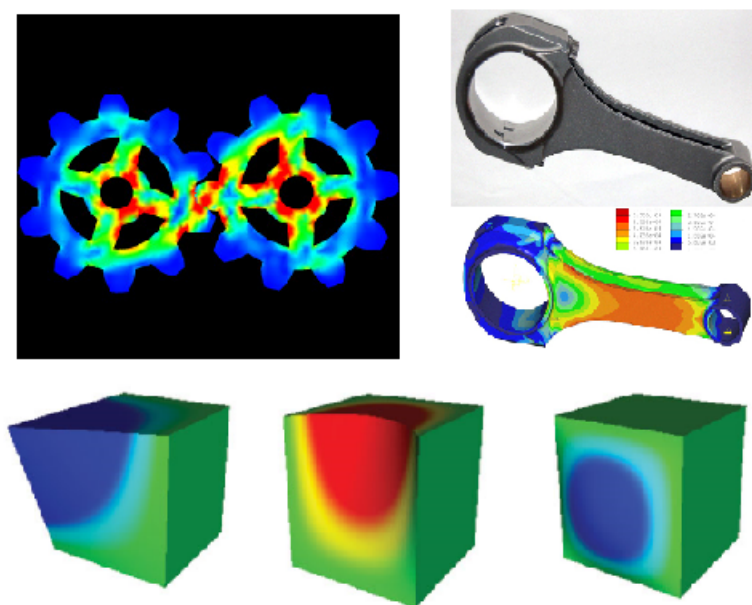


Figura 3.19: Exemplos da utilização do método dos elementos finitos. [7, 8, 9]

se optou por não incluir esta análise de forma concreta nesta dissertação. Não tendo sido também encontrada nenhuma referência à aplicação desta tecnologia à optimização construtiva para estes equipamentos.

3.3 Conclusão

Este capítulo contribuiu para o entendimento do autor acerca das considerações técnicas na determinação tanto de curto-circuitos como de esforços.

O estudo efectuado permite também um maior enriquecimento teórico a toda a estrutura deste projecto, já que foi possível esmiuçar as formas de cálculo necessárias à realização das componentes práticas.

O conhecimento das várias formas de cálculo induziu a uma melhor definição do processo utilizado na ferramenta (analisado em maior detalhe no capítulo 5).

Foi também importante adquirir o entendimento que se focaram várias áreas da engenharia, com especial foco na electrotécnica (estudo das correntes e seus efeitos no material) e mecânica (estudo dos esforços e efeitos nos suportes).

Capítulo 4

Armários e Barramentos

Após uma análise das possibilidades teóricas do projecto, abordar-se-á neste capítulo a sua implementação técnica direccionada para soluções utilizadas pela General Electric. Antes demais, será necessário apresentar as soluções utilizadas na empresa quanto ao tipo de armários industriais. A escolha dos barramentos e diferentes suportes dependerão também do invólucro utilizado.

Na gama industrial existem vários tipos de invólucros, que serão analisados ao longo deste capítulo.

4.1 Armários e Invólucros existentes

Vai-se tentar explorar as principais soluções existentes a nível de armários, com especial ênfase nos invólucros.

Começamos por referir as *caixas modulares de poliéster - APO*. Estas encontram-se feitas segundo a Norma Internacional, IEC 60439-1 (norma referente à construção de quadros eléctricos de baixa tensão) [15]. Existem nove módulos diferentes, com tamanhos variados. Estas caixas modulares e respectivas tampas são fabricadas em poliéster reforçado com fibra de vidro, no entanto as tampas podem ainda ser fabricadas em policarbonato transparente, de forma a ser possível consultar os aparelhos no seu interior. Estas caixas modulares possuem *classe II* de isolamento devido ao duplo isolamento, tendo um índice de protecção de IP67 pela Norma Internacional, IEC 60529 (norma para os índices de protecção IP) [16]. Estas caixas possuem ainda um nível de protecção IK10 contra forças mecânicas externas, pela Norma Internacional, IEC 62262 (norma para o nível de protecção contra choques mecânicos IK) [17].

Cada caixa grande corresponde a um múltiplo de uma caixa pequena, ou seja existem 9 tamanhos com módulos múltiplos. Estas caixas podem ser de montagem mural e

em poste. Permitem uma temperatura de operação até 70°C (picos de temperatura até 150°C). Estas caixas são também resistentes à corrosão.

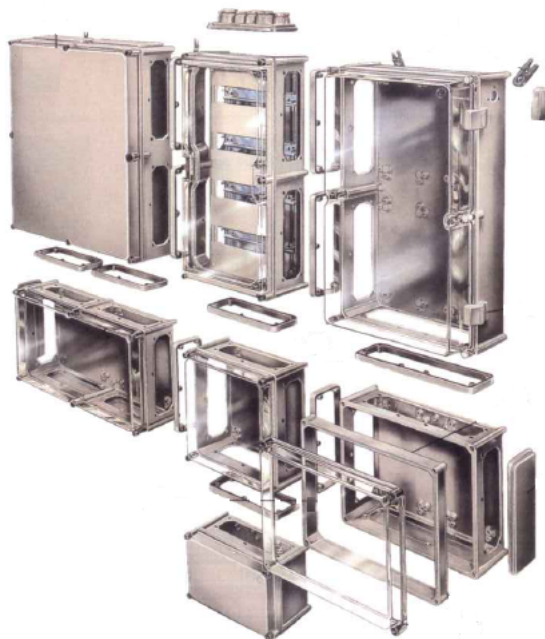


Figura 4.1: Caixas Modulares de Poliéster [3]

De referir que as suas aplicações são variadas, podendo encontrar-se na indústria, estaleiros navais, destilarias, refinarias, fundições e petroquímicas, entre outras. Apesar de tudo, a solução não é muito usada, devido ao seu elevado custo e pequena flexibilidade de instalação. Sendo que são, tal como no nome transparece, próprias para soluções modulares. A sua utilização é própria para aparelhos de instrumentação, até mesmo em instalações não industriais.

Fabricam-se também em poliéster aquilo que se designa como os “*armários muraís*”. Neste caso, existem dois tipos os *ARIA* e os *PolySafe*, ambos homologados segunda as normas internacionais [15] [16] [17]. Estes quadros têm vários tamanhos, pelo que a sua utilização é variada.

Começando por analisar os da série *ARIA*, estes armários são fabricados em poliéster reforçado com fibra de vidro. Estes armários são *classe II* de isolamento, tendo um índice de protecção de IP66. O nível de protecção contra forças mecânicas externas é de IK10. Permitem uma temperatura de operação até 70°C (picos de temperatura até 150°C).

Os *PolySafe* têm características muito similares aos *ARIA*, variando apenas o índice de protecção para IP65. Ambos têm a possibilidade da instalação de uma porta em policarbonato transparente, reduzindo os índices de protecção para IP55 e IK07. Mas

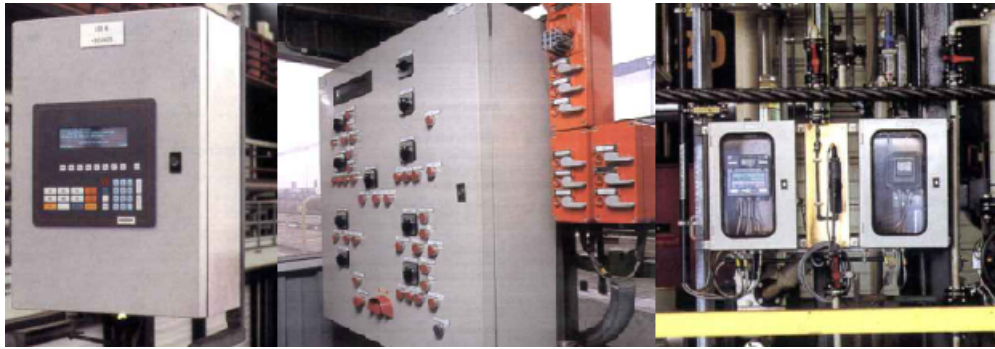


Figura 4.2: Armários Murais - ARIA [3]

a grande diferença entre ambos estes quadros é a sua forma de instalação. Ou seja, os *ARIA* são apenas para instalação mural, enquanto que os *PolySafe*, apesar de terem também a possibilidade de instalação mural, podem ser montados no chão e em poste, podendo também fazer um acoplamento, de mais do que um armário, em altura, largura e profundidade e têm também a possibilidade de montagem de um tecto de protecção do armário. Assim, todas estas possibilidades alargam a gama de utilização dos *PolySafe*. Existe também uma diferença quanto ao custo de cada um, sendo o *ARIA* o que tem um custo, para o cliente final, mais baixo.



Figura 4.3: Armários Murais - PolySafe [3]

As aplicações práticas de ambos os armários são diversas:

- Comerciais - praças de mercado, campismo, locais desportivos, parques, lavagem de automóveis, lavandarias, etc;
- Industriais - Estaleiros navais, minas, automação, petroquímicas, indústria pesada, transformadores, sistemas de controlo, etc;

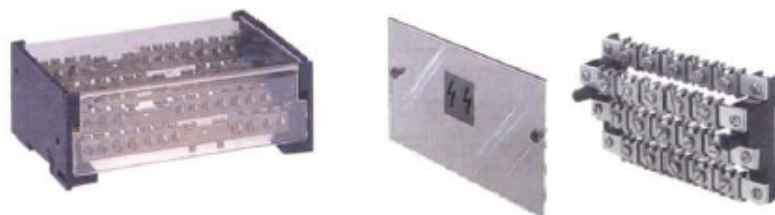


Figura 4.4: Repartidores [3]

- Utilidades - Reciclagem, telecomunicações, semáforos, transportes públicos, energia e distribuição (eléctrica, gás, água), parques fotovoltaicos, iluminação pública, linhas ferroviárias, metro, etc.

Ambas as soluções pressupõem a utilização de repartidores ¹. Sendo assim, não se aplicará o cálculo dos esforços a esta solução de armário. Estas soluções podem ser usadas em caso de instalações de *classe II* e com correntes de serviço não superiores a 400 A. Para que se entenda o que é um repartidor, estes encontram-se explicitados na figura 4.4.

As soluções anteriores são referentes, todas, a armários fabricados em poliéster, tornando a instalação automaticamente numa de *classe II* e eram também armários para instalações com valores de corrente nominal não superior a 400 A. No entanto, em muitas das áreas do sector industrial, os armários existentes terão que suportar correntes mais elevadas de operação. Assim, apresentam-se as soluções que aparecem de seguida.

A estas soluções é dado o nome de sistemas de armários, onde existem os seguintes:

- Modula 630K - metálico;
- Modula Plus - metálico;
- VP - poliéster.

Modula 630K:

Este é um armário fornecido em forma de KIT metálico, com capacidade para operar a uma corrente nominal máxima de 630 A, certificado pelas normas [15] [16] [17]. Possui uma capacidade para suportar uma corrente de pico de curto-circuito, $i_{pkmáx} = 60kA$. Estes armários são fabricados em chapa de aço revestida com pintura époxy nas portas, painéis laterais, tecto, tampas (superior e inferior) e base. É também fabricado com chapa galvanizada não pintada, no painel posterior e KIT de acoplamento.

Neste caso os índices de protecção dependem de os armários serem:

- sem porta - IP40 IK07;

¹Sistema de barramentos pré-fabricado, com secções variáveis consoante a corrente (corrente nominal de 63 a 400 A) e com um poder de corte já definido.



Figura 4.5: Armários Modula 630K [3]

- com porta opaca - IP41 IK08;
- com porta transparente - IP41 IK07.

Além do sector industrial, este tipo de solução é também recomendado para instalações do sector terciário.

Modula Plus:

Este é um armário destinado à distribuição eléctrica de baixa tensão, também no sector industrial e terciário, tal como o anterior. É concebido para ser um armário em forma de KIT, para ser montado, equipado e electrificado por quadristas e instaladores. O armário encontra-se em conformidade com as normas [15] [16] [17]. É um armário de distribuição que é capaz de suportar a instalação de disjuntores abertos de 400 até 4000 A e interruptores de corte em carga até 2500 A.

A estrutura do armário é em chapa de aço, com os seguintes índices de protecção:

- sem porta - IP30;
- com porta opaca - IP50;

Na realidade, este é o único armário em que o dimensionamento dos suportes e cálculo do distanciamento entre eles é passível de se realizar. Em todos os restantes armários as soluções para o suporte dos barramentos encontra-se já pre-definida e dimensionada, sem possibilidade de alteração. Isto acontece também porque este armário é o que tem



Figura 4.6: Armários Modula Plus [3]

um maior regime de operação, ao nível do suporte de correntes de serviço e de curto-circuito que possam existir. Mas a análise das formas de colocação de barramentos e a sua implementação será feito na secção seguinte deste capítulo e será nesse momento que se explicarão as diversas formas construtivas.

Sistema VP:

Este é um armário mais polivalente que os anteriores visto que é fabricado em poliéster permitindo a sua utilização em vários tipos de instalações, inclusivé em instalações residenciais. O fabrico em poliéster implica que este se enquadra com os parâmetros da *classe II*, em conformidade com os requisitos da norma [15]. A sua limitação em comparação com o anterior prende-se com o facto de poder operar até um máximo de 1250 A de corrente nominal, não sendo possível utilizar esta solução em projectos de maior envergadura.

Estes sistemas de armários podem ser tanto murais como de montagem no solo. São armários de duplo isolamento, com espelhos de protecção igualmente isolantes, fabricados em poliéster reforçado a fibra de vidro, as suas portas são em chapa de aço electrozincado e possuem as seguintes, como já dito, classificações [16], [17] :

- sem porta - IP30 IK10;
- com porta opaca - IP54 IK10;

Das suas características, destaca-se o valor de resistência dinâmica contra curto-circuitos, $i_{pkmáx} = 110kA$. No caso do sistema ser mural, este terá uma limitação de operação aos 400 A de corrente nominal.

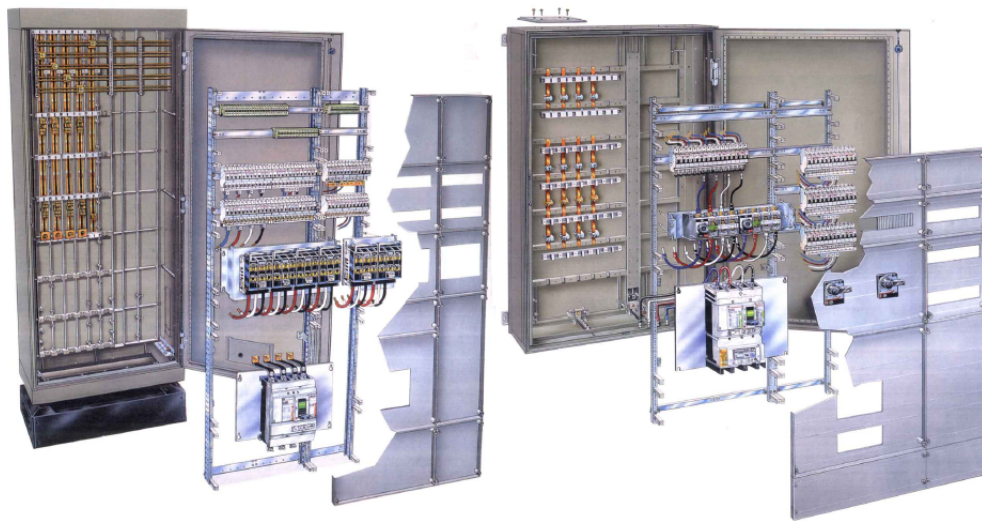


Figura 4.7: Sistema VP - Armários de solo e murais [3]

4.2 Barramentos

Para o tipo de instalação aqui estudado prevê-se apenas o uso de barramentos de cobre e não de alumínio.

“(...) for equal conductivity, aluminium is lighter than copper and while this is an advantage in some applications, it is not usually important in indoor types of switchgear up to 33 kV. Here, weight is not a decisive factor so much as bulk, particularly in metal-clad or other enclosed types, and as aluminium conductors must have about 60% greater sectional area than copper for the same current rating, the latter material is often preferred.” [32]

Sendo a utilização do cobre, uma solução que corresponde à realidade do mercado.

Neste caso, começa-se por explorar as soluções de repartidores. Então e como já foi referido anteriormente, estes sistemas de barramentos pré-fabricados estarão preparados para funcionarem desde os 63 A aos 400 A. Existem os repartidores para suporte em calha DIN ²:

- corrente nominal de 63 A - Barras de Cu 6,5x9 mm ³;
- corrente nominal de 80 A - Barras de Cu 10 x 6, L = 80 mm, dimensionada para 21kA pico;
- corrente nominal de 125 A - Barras de Cu 10 x 6, L = 120 mm, dimensionada para 30kA pico;

²calha DIN - suporte para fixação de material nos quadros.

³Repartidor fora de utilização



Figura 4.8: Suportes utilizados na gama industrial até os 630A de corrente nominal [3]

- corrente nominal de 160 A - Barras de Cu 12 x 5, $L = 126$ mm, dimensionada para 35kA pico;

E existem também os repartidores para fixação em perfil:

- corrente nominal de 250 A - Barras de Cu 20 x 5, $L = 200$ mm, dimensionada para 35kA pico;
- corrente nominal de 400 A - Barras de Cu 32 x 5, $L = 275$ mm, dimensionada para 44kA pico;

Sendo estas as soluções utilizados em quadros equipados para correntes nominais até 400 A, existem no entanto suportes e barramentos separados, próprios para correntes de serviço iguais e superiores.

No caso do armário *Modula 630K* e no *Modula Plus*, considerando casos de corrente nominal até 630A, sabe-se que não é possível otimizar a colocação dos suportes que sustentam os barramentos pois, para estes casos, utiliza-se apenas dois suportes nos extremos até 400A e mais um suporte intermédio, no caso de valores superiores e até os 630A. Existe assim o suporte dos barramentos colocados paralelamente ou com suporte em escada. Ambas as soluções permitem a sua montagem em cela lateral colocada ou à direita ou à esquerda do armário. A montagem tanto pode ser efectuada com a colocação dos barramentos paralelamente opostos ou utilizando a montagem em escada.

Os suportes utilizados em todas estas soluções, e para melhor entendimento, podem ser visualizados na figura 4.8.

No caso dos barramentos montados paralelamente, pode-se também fazer a montagem destes no armário na zona posterior, atrás da aparelhagem que constitui o quadro. Neste caso, a colocação dos barramentos, além de poder ser feita na vertical, também pode ser feita na horizontal. Solução que pode ser visualizada na figura 4.9.

Para todos os casos, até aos valores de corrente nominal de 400 A, utilizam-se as barras com as dimensões apresentadas anteriormente. No caso de estarmos a falar de correntes

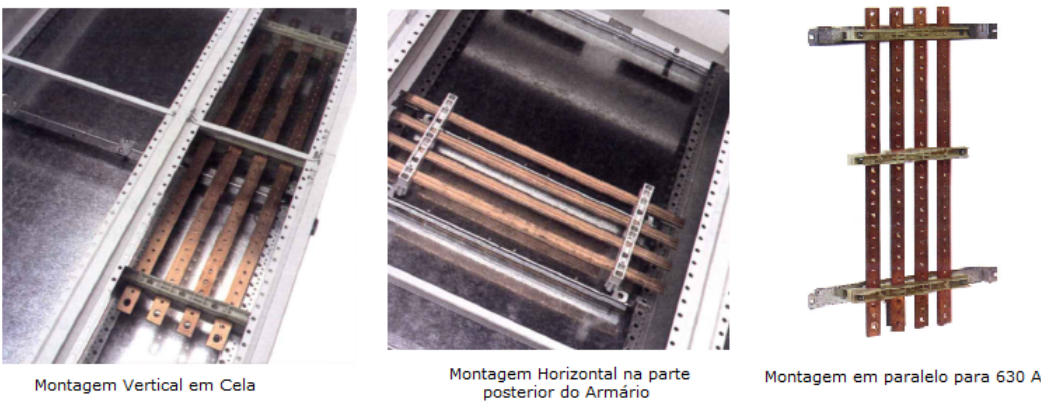


Figura 4.9: Formas de montagem de barramentos até 630 A (montados em cela e armário) [3]

superiores e até aos 630 A, utiliza-se um conjunto de 4 barras de 30 x 10 (mm), com 1 metro de comprimento, dimensionadas até 44kA de corrente de curto-circuito de pico.

No *sistema VP* de armários, os barramentos podem ter formas construtivas diferentes, que aqui serão apresentadas mas que, por experiência da empresa, se sabe que são soluções que não estão a ser implementadas. Com isto, está-se a referir por exemplo os barramentos em forma ‘C’. Sendo os barramentos com secção rectangular, as soluções de uso real e prático.

Apesar desta consideração, estamos a falar de armários que têm possibilidade de ter correntes de serviço até 1250 A. Na sua gama de barramentos, existe então a possibilidade de montagem dos barramento na vertical (consultar a tabela 4.1) ou a montagem dos barramentos na horizontal (tabela 4.2).

De referir que os espaçamentos standard que se deve manter entre os suportes (ou seja, para a montagem dos barramentos) estão também explicitados nas tabelas referidas. Tal como nos armários anteriores, também este quadro permite a montagem de barramentos na zona posterior aos aparelhos modulares que constituem o quadro eléctrico. Podem-se

Tabela 4.1: Barramentos Verticais para o sistema VP de armários [3]

Barramentos - Barras de Fases Horizontais				
Secção dos Barramentos (mm)	2 x 20 x 5	2 x 30 x 5	2 x 20 x 10	2 x 30 x 10
Corrente Nominal (A)	630	800	1000	1250
Resistência à corrente de CC de pico (kA)	40/53	53/63	63/110	63/110
Distância entre Suporte (mm)	392/218	392/218	392/218	392/218

Tabela 4.2: Barramentos Horizontais para o sistema VP de armários [3]

Barramentos - Barras de Fases Verticais							
	Secção dos Barramentos (mm)	12 x 5	12 x 5	100 mm2	340 mm2	2 x 20 x 10	2 x 30 x 10
	Corrente Nominal (A)	250	250	400	800	1000	1250
	Resistência à corrente de CC de pico (kA)	30	30	53	110	110	110
	Distância entre Suporte (mm)	225	225	225	225	225	225

ver os vários suportes para os sistema VP na figura 4.10 .



Figura 4.10: Suportes para o sistema VP de armários [3]

Também este armário permite a montagem em cela lateral. Quando se fala de correntes superiores aos 800 A, está-se a falar de montagem apenas em cela, utilizando os suportes em escada. Para correntes inferiores aos 800 A, existe a possibilidade de montagem em cela e também de montagem na parte posterior do armário, utilizando os outros suportes consoante a corrente nominal do quadro em questão. Pode-se visualizar dois exemplos práticos de montagem de barramentos no sistema VP na figura 4.11, à esquerda montagem posterior e à direita montagem em cela.

Estivemos a falar até ao momento de equipamentos e montagens já pré-estabelecidas e sem possibilidade de optimização através deste projecto, mas que ficam como um estudo e explanação às possibilidades e soluções técnicas existentes, que compõem uma gama de quadros eléctricos de baixa tensão, que abrangem valores de corrente de serviço vastos.

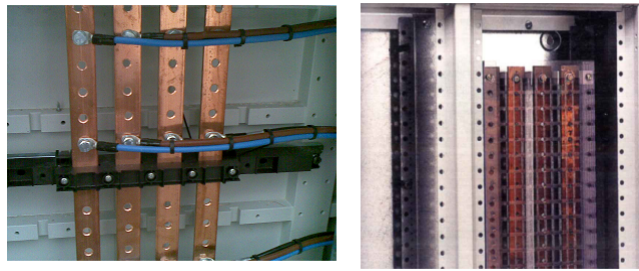


Figura 4.11: Exemplos de montagem em armários de sistema VP

Assim, o armário *Modula Plus* é o que permite um regime de operação mais alargado, pois permite operar até correntes de 4000A, como já estava referido anteriormente. Já se viu que, até correntes de 630 A, a utilização e instalação de barramentos se assemelha ao armário *Modula 630*. É a partir deste valor de corrente e até aos 4000 A que torna a utilização de barramentos variada. Como estamos a falar de instalações industriais, de maior envergadura e com regimes de tensão mais elevados, estaremos também a falar em correntes de curto-circuito que podem atingir valores altos. Sendo que, por experiência, a normalidade na larga maioria dos projectos aponta para valores de I_{cc} usuais de 50kA. No entanto, podem existir projectos em que estes valores sejam mais elevados. É no sentido de ponderar todas as possibilidades, que o estudo de esforços electrodinâmicos e de optimização da instalação de suportes se torna interessante. Mesmo a nível de quadristas que usam soluções fabricadas por eles, mas com equipamento de controlo GE, ou seja empresas com capacidade de produção, que fabricam os seus próprios armários e suportes.

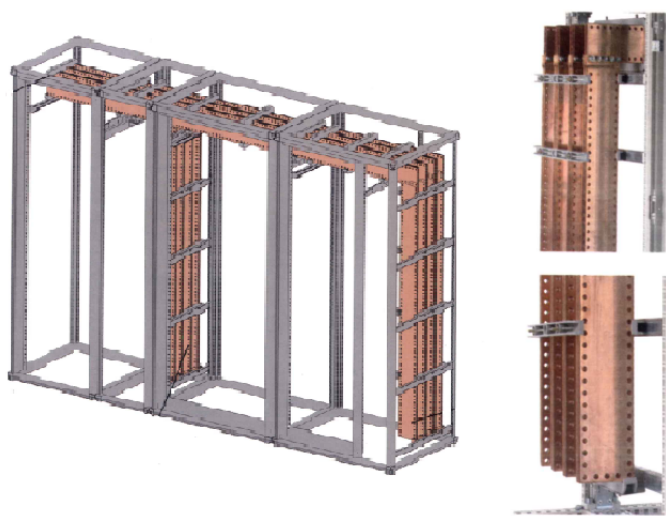


Figura 4.12: Exemplo de Montagem de Barramentos no armário Modula Plus [3]

Tabela 4.3: Secções de Barramentos GE para armários Modula Plus [3]

In (A)		Nº da Barras por Fase	Nº de Barras do Neutro	Secção (mm)
IP30	IP55			
740	560	1	1	63 x 5
900	680	1	1	80 x 5
1080	820	1	1	100 x 5
1250	930	2	1	63 x 5
1250	980	1	1	125 x 5
1835	1350	2	1	100 x 5
2140	1600	2	1	125 x 5
2800	2000	3	1	125 x 5
3500	2600	3	1	160 x 5
4000	3100	4	2	160 x 5

Apesar de se ter feito um estudo de forma a que a ferramenta desenvolvida fosse de utilidade tanto pela GE como pelos seus quadristas certificados, são neste capítulo postos em evidência os equipamentos para armários da GE. E, por consequência, o suporte da GE. No capítulo seguinte vai-se alargar a visão, tornando-a abrangente no sentido do cálculo de esforços e de suportes se adequa a soluções generalistas.

No caso do *Modula Plus*, para correntes de serviço até 4000A e para correntes de I_{cc} que podem chegar aos 80kA, a montagem e suporte de barramentos é feita como se pode ver na figura 4.12.

Os barramentos utilizados, são também produzidos pela empresa em questão, pelo que as secções dos próprios barramentos nem sempre é a normalizada (valores normalizados presentes na tabela 3.2). Essa opção prende-se com uma normalização produtiva, optando-se por fabricar barras de cobre de 5 mm de espessura de forma a que o fabrico das barras e dos suportes seja uniformizado, de forma a reduzir os custos de produção. Os barramentos são todos compostos por barras de cobre de 5 mm de espessura, com um comprimento de 1650 mm. Todos os barramentos são fabricados de forma a terem suportes nas extremidades. O barramento vertical pode ser instalado numa cela lateral, à esquerda ou à direita, integrada num armário com 900 mm de largura, ou então numa cela lateral, acoplável. O barramento horizontal pode ser instalado a qualquer altura na estrutura do armário, ocupando 250 mm (até barras de secção 125 x 5 mm) ou 300 mm (para barras de secção 160 x 5 mm). Para as diversas correntes nominais, pode-se ver os barramentos fabricados pela GE na tabela 4.3.

Pode-se instalar até 2140 A em armários com 500mm de profundidade (máximo de 2 barramentos por fase) e 4000 A em armários com 700 mm de profundidade (até 4 barras por fase). De ressaltar, que neste caso, os suportes para o barramento horizontal e vertical são os mesmos. Para este armário e para estas correntes, o suporte é universal, assim como os barramentos e as formas de montagem. O suporte utilizado é fabricado em poliéster reforçado a fibra de vidro e tem as características construtivas presentes na figura 4.13.

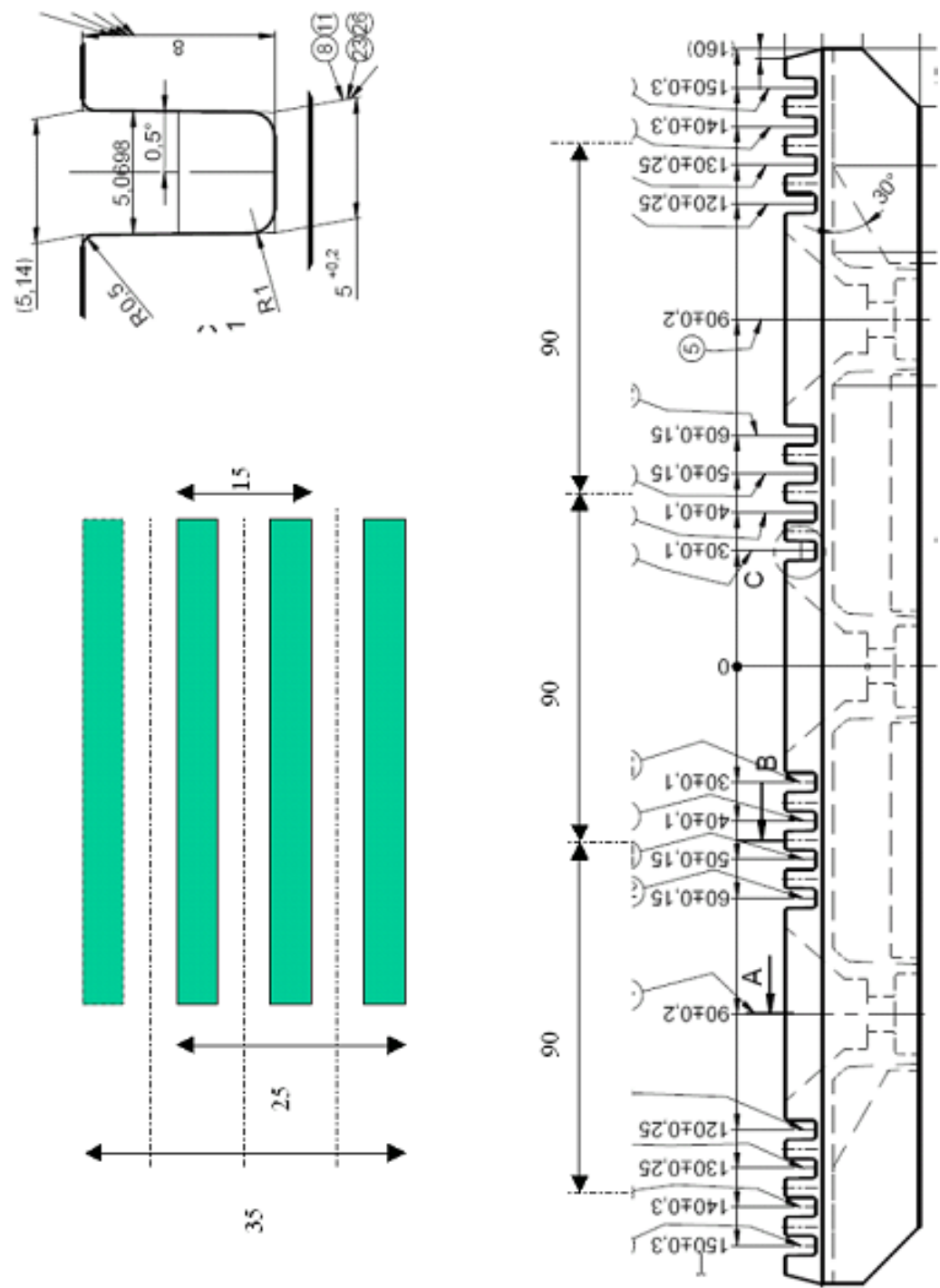


Figura 4.13: Suporte Universal utilizado no armário Modula Plus

Claro que prender este projecto a soluções da GE tornava-se muito limitativo. E visto que a definição e forma do cálculo se aplica a todos os instaladores, tornou-se a ferramenta desenvolvida abrangente, no sentido em que ela se aplica a qualquer secção de barramentos e a qualquer tipo de instalação. Portanto, no caso de o quadrista fabricar os seus próprios armários e os seus próprios suportes, porque têm essa capacidade produtiva, pode utilizar a ferramenta, de forma a otimizar a sua construção.

O suporte de barramentos da GE é já pré-determinado de fábrica, com uma distância entre fases já definida e material construtivo com um momento resistente já conhecido. É possível, utilizando a ferramenta desenvolvida neste projecto e que se apresenta nos capítulos seguintes, a inserção dos parâmetros desejados aplicando-os a cada solução fabricada.

Existe, no entanto, um factor que é comum a todos: existe na realidade a possibilidade de montar barramentos pintados nos quadros eléctricos. E apesar de esta ter sido durante muitos anos uma solução usada visto que, para uma secção inferior, se permitiam correntes de serviço elevadas, hoje esta é uma solução construtiva que não se usa. Por experiência, chegou-se à conclusão que a utilização de barramentos pintados era muito onerosa, devido a:

- custo elevado de manutenção - pintura periódica dos barramentos e junções;
- custo de instalação - após a instalação, é necessário fazer rectificações minuciosas, à mão, aos barramentos e junções.

Estas necessidades, consumiam uma quantidade de tempo e recursos que hoje não se acredita ser rentável. Por isso, na realidade, assim como neste projecto, apenas se consideram barramentos de cobre nú.

4.3 Conclusão

Em síntese, pode-se dizer que existe uma diversidade grande de soluções para as mais variadas condições de instalação. Mas nessa diversidade, chegou-se à conclusão que quase todas as soluções de armários têm uma forma de colocação de barramentos e de suportes, pré-definida e pré-fabricada. Serve este capítulo também para conhecer as várias condicionantes às montagens dos barramentos, tentando demonstrar e explicar as formas possíveis de o fazer.

Compreendeu-se que apenas uma das soluções (referente ao armário *Modula Plus*, que é também a única solução que permite uma utilização até os 4000A de corrente de serviço) tem na sua génese a permissão de colocação de barramentos “à vontade” do instalador. E é nessa perspectiva que o cálculo de esforços e respectivo cálculo de espaçamento entre suportes encontra a sua utilidade.

Mas também se conclui que, este sendo um projecto abrangente, serão consideradas todas as soluções fabricadas por outros ‘quadristas’ (ou seja outro tipo de armários), sendo que os resultados deste projecto poderão ser adaptados a qualquer solução.

Capítulo 5

Ferramenta para Quadristas

Este capítulo pretende ilustrar a forma como está desenvolvido o software que servirá de ferramenta para o desenvolvimento de projectos em quadros eléctricos de baixa tensão. Também se apresentam as etapas de interacção com o utilizador e os resultados finais da ferramenta.

Aplicou-se a ferramenta e o respectivo processo de cálculo a uma solução conhecida, de forma a comprovar a veracidade das conclusões retiradas do estudo teórico.

5.1 Software Desenvolvido

O software de que se fala é a ferramenta que calcula os esforços electrodinâmicos e o espaçamento entre suportes. Esta ferramenta é baseada na fundamentação teórica presente no capítulo 3. Mas para uma melhor compreensão do software e também dos cálculos, far-se-á uma intercalação entre ambos.

Esta ferramenta foi implementada em Visual Basic, a ‘correr’ por cima de uma base de dados e de cálculo feita em folhas de Excel. Sendo que se optou por usar o Visual Basic apenas como uma ferramenta de comunicação com a folha de Excel. Ou seja, todo o cálculo efectuado é feito na folha de cálculo e não por linguagem de programação. Optou-se por esta solução visto que a interligação de fórmulas é desta forma mais simples.

Assim e de forma a que a ferramenta funcione consoante aquilo que é esperado, é necessário que a sua comunicação com o utilizador seja simples e funcional. Criaram-se formulários, que se tencionam simples, de forma a que o utilizador forneça todos os dados necessários para a realização dos cálculos.

A ferramenta baseia-se em quatro formulários de Visual Basic, e estes têm desenhado na sua estrutura as caixas que permitem solicitar ao utilizador os valores necessários para o programa funcionar, assim como caixas de informação para ajudar na escolha das selecções possíveis.

Esta ferramenta é feita para uma utilização por parte de quadristas e instaladores. Foi feita para uma utilização após a realização do projecto eléctrico.

Por experiência, compreendeu-se que neste caso os quadristas e instaladores utilizam os valores de I_{cc} presentes em projecto, pelo que esta incógnita é então colmatada pela informação do projectista.

Quanto aos barramentos a utilizar, o número de barramentos por fase e a secção dos mesmos, os quadristas e instaladores não utilizam os valores presentes em projecto, muitas vezes por erro de dimensionamento destes ou porque, por vezes, não correspondem a barramentos normalizados, ou então, simplesmente, porque, no seu processo de fabrico de quadros eléctricos de baixa tensão, optam pela utilização de outro tipo de solução para determinada corrente de serviço.

Nessa óptica, uma das preocupações consistiu em fazer uma janela de formulário, que permitisse a escolha deste parâmetro por parte do utilizador.

Existe uma caixa de texto em um dos formulários que permite a inserção da corrente nominal de serviço para o quadro em análise. Assim, o software, por comparação com a tabela 3.2, retorna todas as soluções (nº de barramentos x secções) que satisfaçam a condição de terem a corrente máxima admissível (I_Z) superior à corrente nominal de serviço. Tabela estas baseadas em valores normalizados. Várias opções irão corresponder à permissão e nesse sentido, competirá ao utilizador escolher a solução que mais lhe convier. De forma geral, temos o seguinte:

$$\text{Corrente Nominal do Quadro ou Corrente de Serviço} = I_{Serv.}(A)$$

Consultando então a tabela 3.2, verificam-se todos os casos em que se verifica a condição:

$$I_Z \geq I_{Serv.} \Rightarrow (n^\circ \text{ de barras} \times \text{Secção})$$

Como as soluções da GE estão pré-definidas e a sua inclusão é importante, foi incluída uma nota que indica que caso se queira uma solução da GE, a escolha dos barramentos deverá recair sobre determinada selecção, apresentada também em caixas de texto (selecção igualmente feita apenas sobre as soluções que apresentam uma corrente máxima admissível superior à corrente nominal).

Começando pela determinação da força electrodinâmica, esta poderia ser feita por fase utilizando as considerações feitas na equação 3.41, sendo possível obter uma representação gráfica do momento no tempo em que se verifica a força electrodinâmica máxima. O formulário empregue depende de alguns factores que poderiam que ser fornecidos pelo utilizador, mas optou-se por manter tais valores como pré-definidos na base da ferramenta (valores de R , de X , também do ângulo do factor de potência, ϕ , e do ângulo de esfasamento, α), pois são os que levam à corrente de pico máxima:

- Ângulo do factor de potência: $\cos(\phi) = 0$;
- Instante angular em que ocorre o curto-circuito: $\alpha = 0^\circ$;
- Valor da Resistência da rede: $R = 0$.

Estas pré-definições implicam, na realidade, que o valor da corrente de pico calculada é correspondente à equação 3.38, onde a constante 'k' é igual a 2. Mas para baixa tensão este valor é correspondente a 1,8, sendo que na base de cálculo se procedeu a esta alteração. Esta alteração parte também do pressuposto já explicitado que a corrente é igual em todas as fases (curto-circuito trifásico simétrico). Sendo neste caso a formulação estática.

Nesta fase ainda, existem duas incógnitas que terão que ser fornecidas pelo utilizador. Trata-se do valor da corrente de curto-circuito e da distância entre os barramentos, ou seja, a distância entre fases que se pretende no suporte. Na solução da GE, já sabemos que este valor é de $d = 90mm$, no entanto como esta é uma ferramenta também para empresas com capacidade produtiva, estes devem poder conseguir definir qual a distância entre fases que pretendem.

A forma de cálculo que leva ao dimensionamento do espaçamento entre suportes, aparece então e como já referido no capítulo 3, da junção entre as fórmulas de determinação dos esforços electrodinâmicos, equação 5.1, e do momento de flexão (com aplicação da força de forma uniforme ao longo da barra), equação 5.2.

$$F = 0,2 \cdot I_S^2 \cdot \frac{l}{d} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} M_{máx} &= \frac{F}{4} \cdot \frac{l}{2} = F \cdot \frac{l}{8} \Leftrightarrow \\ F &= \frac{M_{máx} \cdot 8}{l} \end{aligned} \quad (5.2)$$

É possível, igualando a componente da força das equações, obter a grandeza a alcançar, que é a da distância entre suportes.

$$0,2 \cdot I_p^2 \cdot \frac{l}{d} = \frac{M_{máx} \cdot 8}{l} \quad (5.3)$$

$$l^2 = \frac{M_{máx} \cdot 8 \cdot d}{0,2 \cdot I_p^2} \quad (5.4)$$

$$l = \sqrt{\frac{M_{máx} \cdot 40 \cdot d}{I_p^2}} \quad (5.5)$$

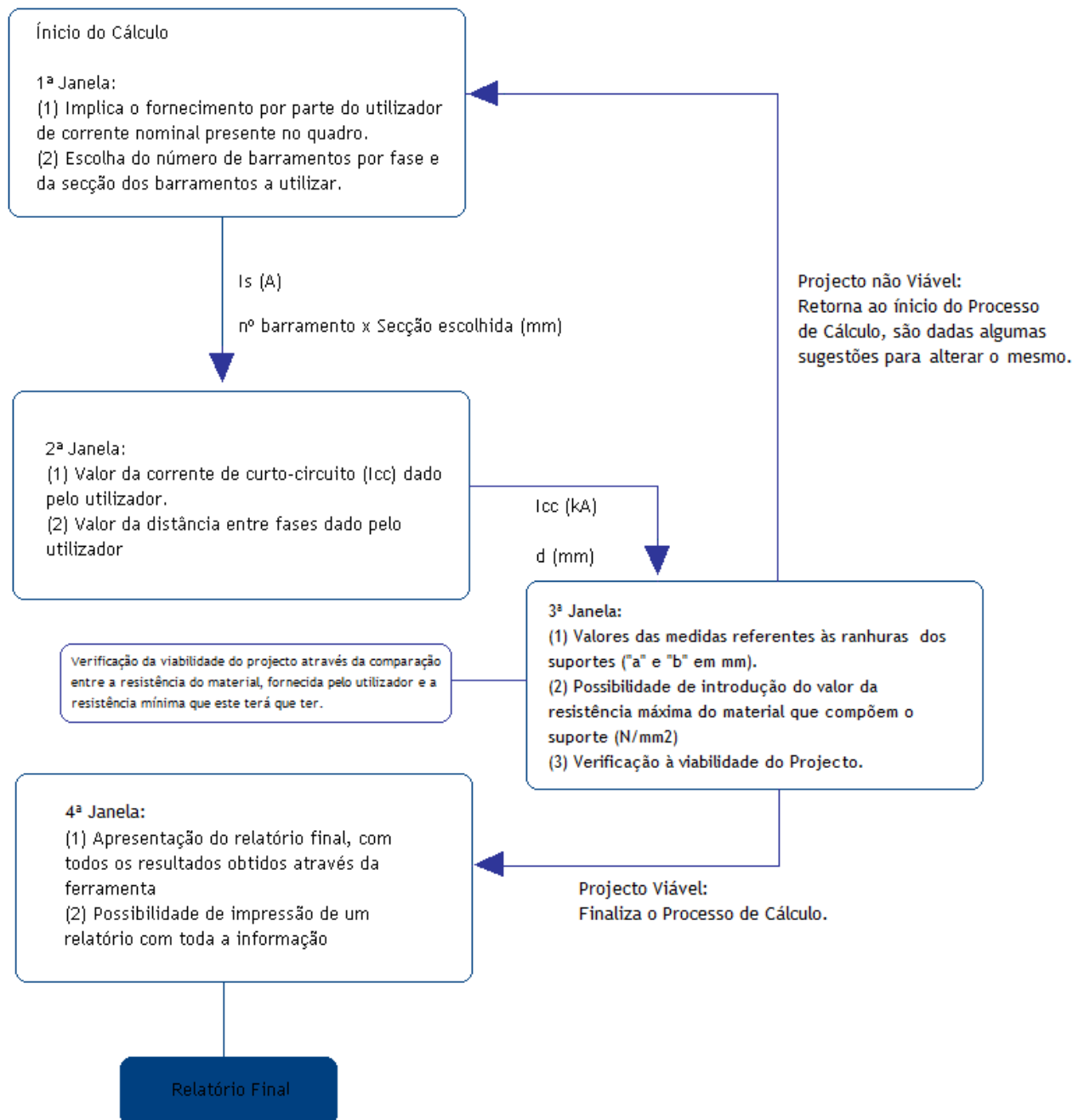


Figura 5.1: Diagrama do utilizador da Ferramenta desenvolvida

Na fórmula anterior, I_p é a corrente de pico da corrente de curto-circuito. Como já foi referido, a fórmula que permite obter esta corrente é a equação 3.38. Os valores para os momentos máximos encontram-se na tabela 3.1, visto que já tinham sido calculados no capítulo 3.

A distância d , a I_{cc} e a corrente de serviço (para a escolha da solução de barramentos e consequente cálculo do momento) são incógnitas e todas têm que ser conhecidas de forma a poder concluir o processo de cálculo definido.

O cálculo da força que terá que suportar o suporte, sendo que nesta fase já foi calculada a distância entre suportes, pode ser calculada pela equação 5.2. Na maior parte dos manuais o valor da força é apresentado em *quilograma · força*, mas sendo a unidade do sistema internacional o *Newton*, optou-se por incluir ambos na apresentação dos resultados da ferramenta:

$$F = \frac{M_{\max} \cdot 8}{l}(N) \Rightarrow F(kgf) = \frac{F(N)}{9,8} \quad (5.6)$$

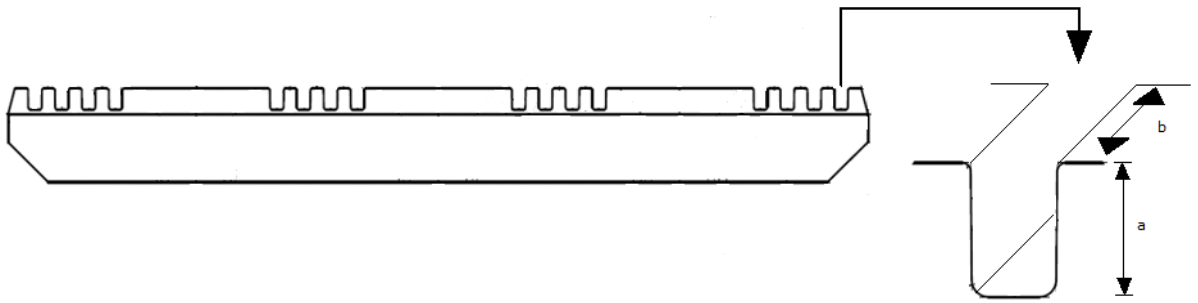


Figura 5.2: Ranhuras de suporte para sustentação de barramentos.

Analisando a figura 5.2, pode-se ver que existem dois parâmetros necessários para saber qual a superfície que estará em contacto com o barramento, que são os parâmetros “ a ” e “ b ”. Conhecendo esses dois valores será então possível determinar a superfície de contacto a que chamaremos “ S ”.

$$S = a \times b(mm^2)$$

De forma a determinar a resistência à fadiga mínima que terá que ter o material que constitui o suporte, é necessário o já calculado valor da força, usando-se a seguinte expressão:

$$r_{materialdosuporte} = \frac{F(N)}{S}(N/mm^2) \quad (5.7)$$

O conhecimento dos dados referentes à produção do suporte são essenciais, no entanto vão-se supor duas situações.

1. Sabe-se, *à priori*, o valor da resistência à fadiga do material do suporte;

2. Quer-se determinar o valor da resistência à fadiga mínima que terá que ter o material do suporte.

Ou seja, na primeira situação utilizar-se-á o cálculo feito pela ferramenta para o comparar com o valor conhecido e fornecido pelo fabricante de forma a verificar a viabilidade do projecto, aliás como se pode ver no diagrama apresentado na figura 5.1. No caso do projecto retornar como não viável, são dadas ao utilizador algumas sugestões para alterar o mesmo, de forma a que este se torne viável. As sugestões são as seguintes:

- Aumento do valor da secção do barramento;
- Aumento do número de barras por fase para a mesma secção;
- Aumento da distância entre as fases no suporte;
- Alteração da secção da ranhura do suporte a e b ;
- Alteração do material de construção do suporte, aumentando a resistência deste.

Na segunda situação, visto que o fabricante quer saber qual a resistência mínima à fadiga que terá que ter o material, o projecto retorna sempre como viável (até porque não existe termo de comparação), sendo dada a indicação de qual o valor da resistência que terá que ser cumprido (na realidade, esta indicação é também dada na primeira situação mas apenas se o projecto, segundo os parâmetros, for viável).

As sugestões apresentadas anteriormente também se aplicam a esta situação.

Baseado nas informações fornecidas pelo utilizador, é feito o cálculo dos espaçamentos entre suportes e também das forças que estarão a ser exercidas nestes.

O cálculo pode ser efectuado para qualquer valor de corrente de curto-circuito (valor eficaz), e tipo de solução de barramentos escolhida. Na folha de cálculo é então definida a corrente de pico do curto-circuito, equação 3.38, e são feitos, de seguida, os respectivos cálculos. Para informação do utilizador, é retornado através dos formulários o valor da força electrodinâmica, o valor da força real que o suporte terá que suportar, o distanciamento entre *suportes* e a resistência à fadiga mínima que o material do suporte terá que ter.

Na fase final, tendo concluído o processo sem erros, será apresentado um relatório final do projecto, contendo todas as informações referentes ao mesmo.

5.1.1 ‘Interface’ com o Utilizador

Esta secção permite ilustrar visualmente quais os interfaces da ferramenta (software) com o utilizador.

Nessa perspectiva, a primeira janela de contacto com o utilizador, aquando da abertura da ferramenta, é apresentada na figura 5.3.

Nesta janela podem-se ver três botões.



Figura 5.3: Menu que Inicia a Ferramenta Desenvolvida

O primeiro botão permite o início do software, lançando o processo de cálculo propriamente dito. No caso de se pressionar este botão, será lançado imediatamente o formulário seguinte.

O segundo botão é referente a uma ajuda para que o utilizador entenda o processo que rege o programa, premindo esse botão é aberta uma janela onde é possível ver um diagrama, visível na figura 5.1, onde é explicitado esse funcionamento.

O terceiro botão, “Sair”, é referente à possibilidade de terminar o programa. Em caso de saída do programa sem ter iniciado o processo de cálculo, existe a possibilidade de o iniciar de novo, através de um botão presente na primeira folha visível do ficheiro de excel (isto para não ser necessário fechar e voltar a abrir o arquivo de Excel).

Dando início ao processo e tendo já premido o botão de início do cálculo, a janela de interacção com o utilizador inicial é a apresentada na figura 5.4.

Nesta janela, e como se pode ver, é então requerido ao utilizador a inserção do valor da corrente de serviço do quadro, essa escolha e o pressionar do botão “Secção do Barramento” faz com que o programa preencha as caixas em baixo com todas as soluções possíveis para a corrente especificada. Desta apresentação espera-se que o utilizador faça a escolha da solução que mais lhe convier. Esta escolha implica que o sistema na sua base aponta a resolução do problema para essa escolha. Isto quer dizer que o cálculo dos momentos, que dependem do número de barramentos e da sua respectiva secção, passam a ser calculados segundo esse pressuposto.

A indicação das caixas de texto que aparecem em ‘segundo lugar’ são uma referência

no caso de se querer optar por uma solução da GE. Nesse caso terá, necessariamente, que se escolher uma das soluções lá indicadas (apenas são indicadas soluções quando estas forem indicadas para as correntes de serviço estipuladas pelo utilizador).

No caso de não selecção de um dos parâmetros requeridos, e premindo o botão “Continuar”, o programa retorna um erro, indicando que todos as selecções deverão ser efectuadas.

O botão “Continuar” permite-nos saltar para o formulário seguinte.

O segundo formulário é apresentado na figura 5.5. Este formulário tem duas caixas de texto onde o utilizador deverá inserir os dados referentes à corrente de curto circuito do projecto, sem se preocupar com os valores máximos de pico, pois o programa internamente, faz já a conversão para esse valor. Posteriormente, esse valor de pico é usado nos cálculos. A segunda caixa de texto permite que o utilizador insira o valor da distância entre barramentos, valor esse que depende do suporte utilizado: no caso da GE, será um suporte com $d = 90(mm)$, mas, no caso do instalador que fabrica estes equipamentos, a especificação será a referente ao seu equipamento.

Figura 5.4: 1ª Janela de Interface com o Utilizador

Figura 5.5: 2ª Janela de Interface com o Utilizador

No caso de não inserção de um destes parâmetros, e premindo o botão “Continuar”, o programa retorna um erro, indicando que todos os campos deverão ser preenchidos.

Ainda nesta janela, e sendo que já foram fornecidos os dados necessários, o programa calcula e apresenta a força electrodinâmica, o espaçamento entre suportes e a força que o suporte terá que ‘aguentar’, no limite (em N e em kgf).

Quando se pressiona o botão “Continuar” o programa leva-nos para o formulário seguinte.

Figura 5.6: 3ª Janela de Interface com o Utilizador

O terceiro formulário é o representado na figura 5.6. Neste formulário é requerido ao utilizador que este insira os dados referentes às ranhuras do seu suporte. Pede-se os valores

Relatório Final

Secção do Barramento Escolhido (mm)	160 x 5
Número de Barras por Fase	3
Valor de Curto-Circuito do projecto (kA)	70
Distância entre Fases (mm)	90
Força Electrodinâmica (N/m)	70560
Espaçamento entre Suportes (mm)	386
Força Máxima que terá que Suportar o Suporte (kgf)	696
Força Máxima que terá que Suportar o Suporte (N)	6820
Resistência Mínima que terá que ter o Material (N/mm ²)	14,20








Figura 5.7: 4ª Janela de Interface com o Utilizador

que permitem a definição da secção da ranhura que entra em contacto com o barramento.

Para a definição da ranhura, é pedido o valor de “*a*” e de “*b*”, que representam a largura e comprimento da secção desta. Esses valores são então usados para definir a resistência à fadiga mínima que o material do suporte terá que ter.

Existe ainda uma terceira caixa de texto onde é pedido ao utilizador que indique, caso saiba, o valor da resistência máxima à fadiga do material do suporte que pretendem utilizar. Este valor pode servir como valor de comparação ao calculado pela ferramenta. Esta comparação pode verificar ou não a viabilidade do projecto, retornando uma janela de erro, caso $r_{calculada} > r_{utilizador}$. Essa janela de erro dá algumas sugestões ao utilizador de como alterar o projecto em curso e remete-o para o primeiro formulário, de forma a dar início a um novo processo de cálculo. No caso de não se fornecer este dado, o processo segue sem interrupções, sendo indicado, no final, o valor da resistência à fadiga mínima que o material terá que ter.

O botão “Continuar” permite - como anteriormente - saltar para o seguinte formulário.

O quarto formulário é também o último, pode-se ver que é um resumo do projecto efectuado, sendo compilada toda a informação, tanto fornecida, como produzida pelo programa.

De ressaltar que, neste formulário existe a possibilidade de fazer a impressão do relatório final de projecto, onde é utilizada por defeito a impressora pré-definida do computador onde se esteja a trabalhar. Este relatório final assemelha-se em tudo ao último formulário apresentado na figura 5.7, inclusivé a nível de grafismo.

5.2 Aplicação da Ferramenta

Para um teste à aplicação da ferramenta e do processo de cálculo, optou-se por fazer esse teste à solução da GE, visto que seria o único caso em que seria possível obter a informação necessária por parte da secção produtiva de uma empresa produtora destes equipamentos. Assim, foram requeridos os dados, pressupostos, que levaram ao dimensionamento do suporte estudado e já referido.

5.2.1 Utilizando os pressupostos de dimensionamento da GE

Os pressupostos são os que se apresentam em seguida:

- Valor da corrente nominal, ou corrente de serviço: $I_S = 4000A$;
- Secção do Barramento: $4 \times 160 \times 5 \text{ (mm}^2\text{)}$;
- Valor eficaz da corrente de curto-circuito: $I_{cc} = 70kA$;
- Distância entre fases no suporte: $d = 90mm$;
- Ângulo do factor de potência: $\phi = 78,46^\circ$;
- Ângulo de esfazamento: $\alpha = 0^\circ$;
- Utilizando parâmetros da rede não conhecidos: $\frac{R}{L} = 65$.

No caso da GE, mais do que os pressupostos apresentados anteriormente, é definida uma forma de cálculo que pressupõe um curto-circuito assimétrico. Ou seja, a forma de calcular as correntes nas respectivas fases é feita utilizando a equação 3.36, sem simplificações e aqui reproduzida:

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot [\text{sen}(wt + \alpha - \phi) - \text{sen}(\alpha - \phi) \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}] \quad (5.8)$$

Esta fórmula de corrente permite a obtenção de valores de corrente de curto-circuito por fase. Sendo determinado o valor do esforço electodinâmico máximo por fase através das equações 3.40 3.41. Como já tinha sido dito, o valor de maior magnitude é o valor na fase ‘b’. É feita uma análise de variação temporal, que pemite saber o instante em que ocorre este máximo.

A corrente de serviço e a consequente escolha dos barramentos a utilizar são referentes ao valor mais alto de serviço permitidos pelos quadros e barramentos fabricados pela GE.

O valor de I_{cc} de $70kA$ é definido porque na gama industrial da GE o valor máximo de operação de curto-circuito é exactamente desse valor e a distância entre fases no suporte da GE, como já tinha sido visto, é de $90mm$. Todos os restantes valores foram especificados pelos engenheiros da secção produtiva da GE.

Utilizando estes valores, obtêm-se uma força electrodinâmica máxima na fase B:

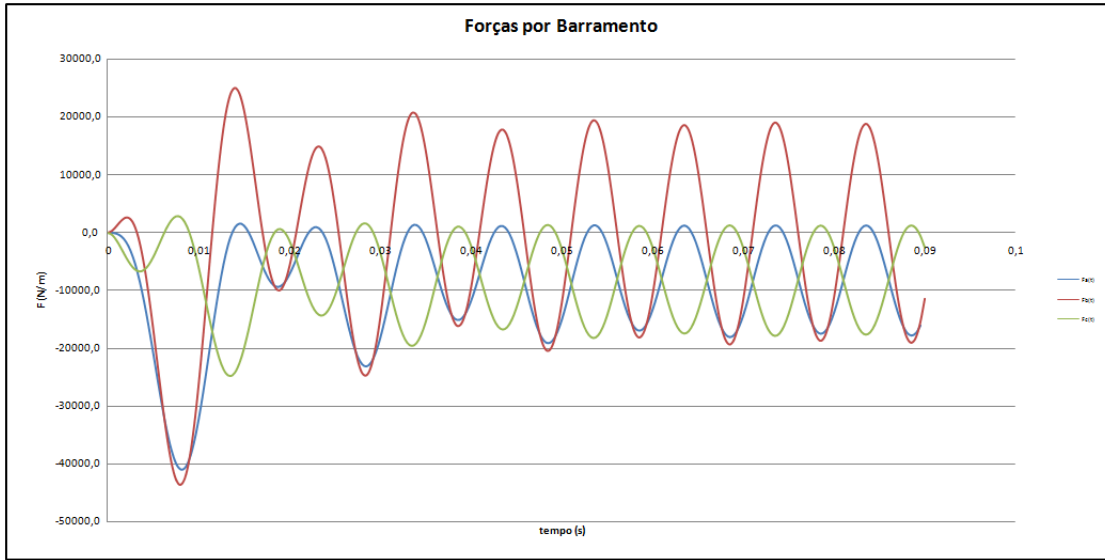


Figura 5.8: 1º Gráfico da variação da força electrodinâmica.

$$f_e = 43605(N/m) \quad (5.9)$$

Mas sabendo que o valor da força electrodinâmica é dado em N/m , é necessário antes de calcular o valor da força exercida no suporte, saber qual o valor de maior distância permitida entre suportes, para que o valor da força seja também o maior possível.

Tendo efectuado os cálculos baseados na equação que permite o cálculo do distanciamento entre suportes, determinou-se que esse espaçamento - para $70kA$ - tendo em atenção os pressupostos definidos é: $l = 595mm$.

Assim, utilizando este valor de espaçamento, o valor da força é o seguinte:

$$F = 663(kgf) \quad (5.10)$$

Considerando a informação obtida por análise do suporte da GE, figura 4.13 e considerando os pressupostos da figura 5.9, é possível definir qual terá que ser a resistência mínima à fadiga que terá que ter o material do suporte.

Considerando que na montagem dos barramentos tem-se dois suportes colocados de forma oposta e a área de contacto da ranhura para o suporte é de $240mm^2$, então $\Rightarrow 240mm^2 \times 2 = 480mm^2$ (a ranhura é possível analisar na figura 5.2, no suporte da GE,

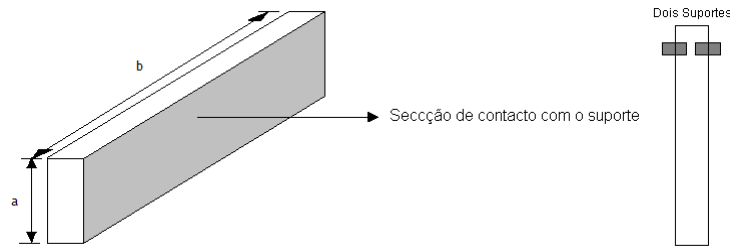


Figura 5.9: Secção de Suporte dos barramentos

$a = 8mm$ $b = 30mm$). Sabendo o valor máximo da força que é aplicado no suporte, obtêm-se a resistência mínima à fadiga que o material do suporte terá que ter.

$$r_{material} = \frac{663}{480} = 1,38(kgf/mm^2) = 13,54(N/mm^2) \quad (5.11)$$

Sabendo que o suporte da GE é fabricado em poliéster reforçado com fibra de vidro e a sua resistência máxima à flexão é:

$$r_{material} = 39,88(Mpa) = 39,88(N/mm^2) \quad [33]$$

Pode-se ver que o valor calculado é inferior a esta referência, ficando assim confirmado que este projecto é viável.

5.2.2 Utilizando os pressupostos de dimensionamento propostos

No entanto, o facto de não ter sido possível obter o porquê das considerações iniciais que levaram ao dimensionamento do suporte implica que se questionasse a validade das mesmas. Até porque os pressupostos utilizados não parecem, na opinião do autor, pressupostos que levem a valores máximos de esforços.

Na prática, sabe-se que as considerações que levariam a um valor de força electro-dinâmica máxima consistem em considerar $R = 0$, e $\phi = 90^\circ$. Utilizando estas mudanças e mantendo os restantes pressupostos:

- Valor da corrente nominal, ou corrente de serviço: $I_S = 4000A$;
- Secção do Barramento: $4 \times 160 \times 5 (mm^2)$;
- Valor eficaz da corrente de curto-circuito: $I_{cc} = 70kA$;
- Distância entre fases no suporte: $d = 90mm$;
- Ângulo do factor de potência: $\phi = 90^\circ$;
- Ângulo de esfazamento: $\alpha = 0^\circ$;
- Utilizando parâmetros da rede não conhecidos: $\frac{R}{L} = 0$.

Estas considerações, e como já foi explicitado anteriormente, pressupõem a utilização da equação 3.38, que considera a corrente igual em todas as fases (curto-circuito trifásico simétrico).

Neste caso, fazendo os cálculos (equação 5.3), obtém-se qual o valor do espaçamento entre suportes, para estes pressupostos, $l = 513mm$.

Esta consideração implica que o valor máximo da corrente é estático e permanente, e portanto a determinação do valor máximo da força electrodinâmica depende a utilização das seguintes equações:

$$I_p = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{cc} \quad (5.12)$$

$$f_e = 0,2 \cdot I_p^2 \cdot \frac{l}{d} \quad (5.13)$$

$$f_e = 70560(N/m) \quad (5.14)$$

Considerando o valor da força electrodinâmica máxima e dos restantes parâmetros, a força exercida nos suportes é:

$$F = 924(kgf) \quad (5.15)$$

Considerando, de novo, a informação obtida na figura 4.13 e considerando os pressupostos da figura 5.9.

$$r_{Material} = \frac{924}{480} = 1,93(kgf/mm^2) = 18,87(N/mm^2) \quad (5.16)$$

Na realidade a resistência mínima à fadiga que o material teria que ter continua a ser inferior aos $39,88(N/mm^2)$ reais do suporte.

No fundo as condições que se usaram agora implicam exactamente a situação extrema de dimensionamento que se usa para a determinação da corrente de pico, equação 5.12, e que leva a um valor da constante 'k' de 2, mas que se alterou para 1,8 já que esse será o valor a utilizar em baixa tensão. Daí os valores mais elevados, visto que não se está a adaptar o cálculo a condição nenhuma, mas sim ao valor máximo possível.

Com isto, conclui-se que estes últimos pressupostos levam a um dimensionamento mais seguro para a instalação, pelo que a opção de usar estes valores como os pré-definidos na ferramenta, parece correcto.

5.3 Conclusão

A ferramenta desenvolvida tem na sua base uma ferramenta de cálculo que é o Excel.

Caso se queira efectuar a inserção de dados na base da ferramenta, será necessário aceder às folhas de cálculo, propriamente ditas. Quanto às fórmulas de cálculo, não se

aconselha a alteração das mesmas, mas é possível efectuar essas alterações, tal como anteriormente.

Quanto aos formulários de interacção com o utilizador, estes permitem uma inserção dos dados, sem que tenha que existir uma preocupação com os promenores de cálculo, o utilizador apenas terá que se preocupar com uma escolha adequada que corresponda às suas necessidades e do projecto que esteja a analisar. Todos os promenores de cálculo e respectivas considerações, apesar de entrarem no processo de cálculo, não exigem nenhum tipo de conhecimento por parte do utilizador.

Apesar de este ser um projecto realizado em parceria com a GE, estão incluídas nesta ferramenta soluções que saem do âmbito das suas soluções, podendo ser usada por todos os instaladores, visto que resultam de um cálculo generalista e que se prende apenas com soluções normalizadas (aliás, na base de dados, os únicos dados não normalizados são referentes a barramentos de secção específica usados pela GE).

Capítulo 6

Síntese e Conclusões

Este foi um projecto sobre quadros eléctricos, sobre os seus invólucros e respectivos índices de protecção, orientado para o dimensionamento de barramentos.

Estudaram-se as correntes de curto-circuito e seus efeitos, nomeadamente os esforços electrodinâmicos provocados nos barramentos dos quadros eléctricos.

Foi feito igualmente um estudo a quais são os esforços nos suportes que sustentam os barramentos e qual a possibilidade de otimizar os espaçamentos entre suportes num quadro eléctrico.

Baseado nestes estudos, desenvolveu-se uma ferramenta capaz de ajudar no desenvolvimento e no projecto referente a quadros eléctricos de baixa tensão.

6.1 Síntese

A análise feita aos diversos tipos de quadros eléctricos de baixa tensão e regras que influenciam a sua constituição permitiu ao autor aprofundar e conhecer características e condicionantes da construção destes equipamentos. Desta forma, no decorrer do estudo referente ao estado da arte, foi ganha uma percepção e uma sensibilidade que permitiu implementar os conhecimentos teóricos ao objectivo prático de forma a que os resultados optimizassem os conhecimentos da empresa e dos seus respectivos instaladores e quadristas.

Quanto aos barramentos, o presente relatório permitiu afinar os valores - apresentados pela empresa - de correntes de serviço especificadas e normalizadas por tipo barramento. Sendo que nem sempre os valores dados pela empresa correspondiam aos valores normalizados.

A divisão portuguesa da empresa encontra-se, na realidade, afastada da secção produtiva dos armários, barramentos e respectivos suportes. Apesar de um conhecimento superficial - suficiente para a apresentação de soluções técnicas para projectos eléctricos -

nem sempre se entendia o porquê de algumas das especificações, e esta dissertação veio colmatar o conhecimento sobre algumas das definições presentes na construção dos quadros. O conhecimento adquirido, assim como a ferramenta desenvolvida, permitiram também uma simplificação de um processo que era muitas vezes manual e baseado em ábacos de cálculo já antigos.

Iniciou-se então o processo de cálculo pelos curto-circuitos que são na realidade fenómenos transitórios, tendo-se tornado por isso necessário determinar qual o valor da corrente máxima, ou corrente de pico. Sabe-se que é esse valor que leva ao aparecimento do valor máximo dos esforços electrodinâmicos nos barramentos, provocando um esforço em forma de momento de flexão nos barramentos. Através da corrente nominal presente no quadro, é feita a escolha de um determinado tipo de barramento, o qual terá que resistir a este momento de flexão sem que ocorra deformação inelástica. Este momento de flexão leva ao aparecimento de um esforço nos suportes que prendem os barramentos aos quadros eléctricos. Usando o valor desta força aplicada aos suportes na ocorrência de um defeito (curto-circuito) consegue-se no limite saber se a produção e o fabrico dos suportes respondem às necessidades das solicitações.

Através da distância entre barramentos (ou fases) e da distância entre suportes previne-se fisicamente e na prática os efeitos das forças electrodinâmicas. Então o estudo realizado permite uma optimização quanto à colocação dos suportes nos quadros eléctricos, tanto para a General Electric como para quadristas e instaladores que sejam seus parceiros. Foi nessa perspectiva que o desenvolvimento da ferramenta se tornou uma mais valia.

O desenvolvimento desta ferramenta foi feita através de Excel e de Visual Basic, tendo sido este um dos requisitos, visto que se pretendia simplicidade, até para posteriores alterações à base de dados. Escolheu-se este software como base, devido à sua massificação e conhecimento - ainda que básico - por grande parte dos utilizadores.

As alterações podem ser feitas se desejado na base de informação e também na base de cálculo do Excel. Primordialmente, o que se pretendia simples eram os formulários de interacção com os utilizadores. Apenas os reais utilizadores poderão aferir da simplicidade da ferramenta, no entanto foi nessa perspectiva que esta foi desenhada e concebida. Apenas se teve tempo para testar com utilizadores muito próximos à própria concepção da ferramenta, pelo que as impressões, apesar de positivas, podem não corresponder à realidade da maioria dos utilizadores.

De ressaltar, finalmente, que apesar de esta ter sido uma dissertação feita em parceria com a GE, os resultados são abrangentes e aplicáveis a soluções normalizadas.

Conclui-se também que algumas das soluções que vêm referenciadas em vários manuais, não são já a realidade do mercado. Destaque-se a não utilização, actualmente, de barramentos pintados, preterindo-se sempre a utilização de barramentos de cobre nú. Existem também algumas soluções referentes a secções não rectangulares para barramentos, que igualmente estão fora de uso, recaindo quase sempre a escolha em perfis rectangulares.

Espera-se ter contribuído, ainda que de forma pequena e humilde, para simplificar o processo de projecto, produção e construção dos quadros eléctricos.

Por último, pode-se dizer que todo o processo de “construção” desta dissertação permitiu um aprofundamento de conhecimentos e sensibilidade do autor em relação aos quadros eléctricos e seus constituintes. Essa aprendizagem foi um estímulo pelo desafio que colocou e por ter resultado no final num enriquecimento do conhecimento sobre o tema abordado, tanto por parte do autor como por parte de todos os envolvidos.

6.2 Trabalhos Futuros

Como possibilidades para realizar trabalhos futuros referentes a este tema e em continuação do trabalho desenvolvido, sugere-se a possibilidade de fazer um estudo aprofundado acerca dos esforços presentes nos quadros eléctricos de baixa tensão utilizando o método dos elementos finitos como ferramenta de cálculo e como ferramenta de análise. Esta ideia pressupõe uma interacção real e diária com a secção produtiva de um qualquer fabricante de quadros eléctricos. Essa inserção na secção produtiva é necessária para que seja possível alterar o desenho dos quadros, da forma de colocação dos barramentos e portanto do desenho dos próprios suportes. Ou seja pretende-se que a utilização daquela poderosa ferramenta de simulação resulte numa optimização da construção dos quadros eléctricos de baixa tensão. Essa solução necessitará de uma componente computacional forte, sendo necessários conhecimentos ou estudos, a nível de programação, profundos.

Noutra perspectiva, poderá ser feito um estudo económico sobre as vantagens inerentes da ferramenta, sendo, nesse caso, uma mais valia o contacto com vários dos clientes finais, quadristas e instaladores, com quem se possa, através da análise de projectos realizados, obter valores monetários referentes às optimizações obtidas.

É também uma possibilidade fazer um estudo das alterações que serão necessárias fazer na construção de quadros eléctricos de baixa tensão que operem em regimes de correntes nominais elevados, ainda que nunca superiores aos 9000 A, para que estes se tornem equipamentos de *classe II*. Estudar quais as implicações técnicas e económicas dessas alterações.

Referências

- [1] <http://html.rincondelvago.com/protecciones-electricas.html>. Acedido em Maio, 2009.
- [2] Otto Guthmann; Rolf Pohlmann; Willi J. Schmitt; Wolfgang Tettenborn; Helmut Wittwer. *Manual de Instalações Eléctricas*. BBC - Brown Boveri, Edição:Ordem dos Engenheiros - Região Norte, Sixth edition, 1982.
- [3] GE Consumer Industrial Power Protection. *Catálogo Industrial: Distribuição Industrial, Reconexão e Comutação, Caixas e Armários Industriais*. General Electric, 2006.
- [4] Determinação das correntes de curto-circuito. Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- [5] *Norme Internationale - IEC 60909*. IEC, First edition, 2001.
- [6] <http://www.fft.be/?id=81>. Acedido em Abril, 2009.
- [7] <http://www.meta-synthesis.com/webbook>. Acedido em Abril, 2009.
- [8] <http://public.ca.sandia.gov/csit/research/visualization/shoe.php>. Acedido em Abril, 2009.
- [9] <http://nylander.wordpress.com/2006/05/>. Acedido em Abril, 2009.
- [10] José Lima Morais e José Marinho Gomes Pereira. *Guia Técnico das Instalações Eléctricas*. CERTIEL - Associação Certificadora de Instalações Eléctricas, Second edition, 2007.
- [11] *DIN. 43671*. DIN - Deutsches Institut Normung, 1978.
- [12] *RTIEBT - Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão, 1ª Edição Anotada - Volume 1*. Direcção Geral de Geologia e Energia, CERTIEL - Associação Certificadora de Instalações Eléctricas, 2006.
- [13] GE Consumer Industrial Power Protection. *Catálogo Residencial: Aparelhagem de instalação, aparelhagem modular e Quadros de distribuição*. General Electric, 2006.
- [14] *International Standard - IEC 60364-4-43*. IEC - International Electrotechnical Commission, Third edition, 2008.
- [15] *Norme Internationale - IEC 60439-1*. IEC, Third edition, 1992.
- [16] *Norme Internationale - IEC 60529*. IEC, Second edition, 2001.

- [17] *Norme Internationale - IEC 62262*. IEC, First edition, 2002.
- [18] Prof. Doutor José Luís Pereira da Silva. *Concepção de Instalações Eléctricas de Utilização em Baixa Tensão - Introdução*. Apontamentos da disciplina de Instalações Eléctricas, FEUP, 2007.
- [19] L. M. Vilela Pinto. *Técnicas e Tecnologias em Instalações Eléctricas*. CERTIEL - Associação Certificadora de Instalações Eléctricas, Second edition, 2003.
- [20] Prof. Doutor Cláudio Domingos Monteiro. Curto circuitos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, apontamentos da disciplina de Regimes Estacionários do Sistema Eléctrico de Energia, 2007.
- [21] José Pedro Sucena Paiva. *Redes de Energia Eléctrica: uma análise sistémica*. IST Press, 2005.
- [22] Prof. Doutor Manuel António Matos. Introdução ao cálculo de curto-circuitos trifásicos simétricos pela norma cei-909, apontamentos da disciplina de instalações eléctricas. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.
- [23] Prof. Doutor José Luís P. Pereira da Silva. Análise computacional de curto-circuitos simétricos com recurso à matriz de impedâncias nodais da rede. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.
- [24] J. Lewis Blackburn. *Symmetrical Components for Power Systems Engineering*. Marcel Dekker, Inc., 1993.
- [25] Stuart M. Wentworth. *Fundamentals of Electromagnetics with Engineering Applications*. John Wiley Sons, Inc., First edition, 2005.
- [26] Joan Gallego i Fernández. *Manual técnico de cálculo de líneas en baja tensión y aplicaciones*. IBERICA BD, S.A., First edition, Maio, 1993.
- [27] James Lathrop Meriam; L. G. Kraige; William J. Palm III. *Mecânica*. Livros Técnicos e Científicos Editora, 5ª edition, 2004.
- [28] Ferdinand P. Beer; E. Russell Johnston Jr; Elliot R. Eisenberg. *Mecânica Vectorial para Engenheiros*. McGraw-Hill de Portugal, 6ª edition, 1998.
- [29] L.M. Vilela Pinto. *MGCALC 1 2*. Merlin Gerin de Portugal, First edition, Fevereiro, 1993.
- [30] Raquel S. Lotti; André Wilson Machado; Ênio Tonani Mazzeiro; Janes Landre Júnior. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. 2006.
- [31] J. N. Reddy. *An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*. Oxford University Press, First edition, 2004.
- [32] R.T. Lythall. *The JP Switchgear Book*. Newnes-Butterworths, Seventh edition, 1972.
- [33] Mauricio Guilherme Artico Silva, Prof. Dra. Teresa Dib Zambon Atvars, Andréa Graf Pedroso, and Dr. Derval dos Santos Rosa. Reciclagem de compósitos de poliéster reforçado com fibra de vidro. IX congresso interno de iniciação científica da unicamp, Setembro 2001.